



TITLE:

トンネル覆工コンクリートの初期
ひび割れ抑制に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

高山, 博文

CITATION:

高山, 博文. トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12398>

RIGHT:

トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ
抑制に関する研究

高山 博文

目 次

第 1 章	序論	1
1. 1	緒言	1
1. 2	研究の目的と構成	3
第 2 章	覆工コンクリートの初期性状に関する問題点への対応の現状	6
2. 1	概説	6
2. 2	既往の研究	6
2. 3	覆工コンクリートに求められる要求性能とひび割れ抑制方法	10
2. 3. 1	要求性能	10
2. 3. 2	ひび割れ抑制方法	13
2. 4	覆工コンクリートの配合と強度	16
2. 5	覆工コンクリートにおける初期ひび割れの発生原因と発生パターン	16
2. 6	まとめ	20
第 3 章	覆工コンクリートのひび割れ実態の分析	23
3. 1	概説	23
3. 2	東北新幹線におけるひび割れ実態調査	23
3. 2. 1	調査方法	23
3. 2. 2	調査結果	25
3. 3	八甲田トンネルにおける施工データの分析	28
3. 3. 1	分析方法	28
3. 3. 2	分析結果	28
3. 4	まとめ	31
第 4 章	覆工コンクリートの初期性状に関する模型試験	34
4. 1	概説	34
4. 2	模型試験	34
4. 2. 1	試験体	34
4. 2. 2	試験方法	35
4. 2. 3	試験ケース	38
4. 3	試験結果	39
4. 3. 1	標準ケース (Case1)	39
4. 3. 2	その他のケース (Case2～Case4)	42
4. 4	まとめ	44

第5章	覆工コンクリートの初期性状に関する現地計測	45
5.1	概説	45
5.2	初期ひび割れに関する現地計測（夏期・冬期）	46
5.2.1	計測条件	46
5.2.2	計測結果	52
5.3	まとめ	63
第6章	覆工コンクリートの初期性状に関する解析	66
6.1	概説	66
6.2	ひび割れ発生メカニズムの解析手法	66
6.2.1	土木学会式による評価法	66
6.2.2	湿気移動を考慮した評価法	68
6.3	乾燥収縮ひずみに関する予測方法の比較	71
6.4	コンクリートの応力度評価	73
6.4.1	コンクリートの温度・収縮ひび割れ発生メカニズム	73
6.4.2	コンクリートの熱特性	78
6.4.3	コンクリートの力学特性	78
6.5	模型試験の解析	80
6.5.1	模型試験の解析モデル、条件	80
6.5.2	模型試験の解析結果	82
6.5.3	模型試験の解析結果のまとめ	89
6.6	「湿気移動を考慮した評価法」の現地計測への適用の検証	90
6.6.1	解析モデル、条件	90
6.6.2	解析結果	92
6.6.3	「湿気移動を考慮した評価法」の現地計測への適用の検証のまとめ	98
6.7	パラメータスタディによる発生要因の解析	99
6.7.1	坑内湿度の影響	100
6.7.2	脱型時間の影響	101
6.7.3	打設温度の影響	102
6.7.4	坑内温度の影響	103
6.7.5	単位水量の影響	104
6.8	まとめ	105

第 7 章	初期ひび割れ抑制方法の提案	108
7.1	概説	108
7.2	坑内環境と蒸気圧の関係	108
7.3	坑内温度と坑内湿度によるひび割れ抑制手法	110
7.4	まとめ	111
第 8 章	結論	114

第1章 序論

1.1 緒言

整備新幹線のトンネルは、主に山岳トンネルの標準工法であるNATM（New Austrian Tunneling Method）で構築されている。この工法では、覆工コンクリートを地山変位が収束した後に、延長10.5mまたは12mの移動式セントルにより全断面を一度に打設し構築しているが、完成後にトンネル天端付近において軸方向に伸びるひび割れがしばしば確認されている。このひび割れの発生パターンは地圧によるものと類似しているため、維持管理段階におけるトンネルの健全度評価に際してしばしば問題となっており、このひび割れ発生の要因について解明することが求められている。

トンネルの覆工コンクリートにおけるひび割れは、地圧等の力を受けることによって生じる応力的なもの、コールドジョイント等の構造的に生じるもの、それ以外の乾燥収縮等によるもののパターンとなることが知られている。応力的なものとは構造的なものは施工時点で対策がとられており維持管理の段階ではあまり問題とはならない。一方、それ以外の乾燥収縮等によるひび割れはコンクリートの硬化時の乾燥収縮や水和熱による温度収縮等により表面に無数のひび割れが生じるものであるが、トンネルの力学的機能に影響を及ぼすものでないとするのが一般的である（以下、このひび割れを「初期ひび割れ」と呼ぶ）。

しかし、鉄道トンネルや道路トンネルのようにトンネル内を列車や自動車等が通行する場合、トンネルは土圧に耐えうる力学的機能を有していることのみならず、コンクリート片の剥落や漏水等により列車や自動車等の通行の安全性を阻害してはならないという機能を有している必要がある。

このようなトンネルに必要とされる機能は、総じて「要求性能」と呼ばれ、これを満たすために許容できる初期ひび割れには自ずと限界があり、許容値以上のひび割れが発生する場合にはその発生要因を推定し、補修を行う必要がある。

例えば、鉄道分野では「鉄道土木構造物等維持管理標準・同解説 トンネル編」¹⁾が性能照査型の維持管理体系を策定している。この中で定められている要求性能を表-1.1に示す。鉄道トンネルでは「はく落に対する安全性」を要求性能として挙げており、健全度判定もトンネル全体を評価するA, B, C, Sを用いた判定のほか、はく落に対する安全性を評価する α , β , γ を用いた判定を別途設けている。

表-1.1 トンネルの要求性能と性能項目の例¹⁾

要求性能	性能項目	具体的な内容
安全性	①トンネル構造の安定性	トンネルが崩壊しないこと
	②建築限界の確保	建築限界を支障しないこと
	③路盤部の安定性	列車の安全な運行に支障するような路盤の隆起・沈下・移動がないこと
	④はく落に対する安全性	列車の安全な運行に支障するようなコンクリート片、補修材等のはく落が生じないこと
	⑤漏水・凍結に対する安全性	列車の安全な運行に支障するような漏水・凍結が生じないこと
使用性	⑥漏水・凍結に対する使用性	漏水が坑内設備の機能に影響を及ぼさないこと
	⑦外観	検査に著しく支障するような汚れがないこと
	⑧周辺環境の保護	周辺環境に有害な影響を与えないこと
復旧性	⑨災害時等の復旧性	復旧対策が必要となるような災害時の偶発的な作用を受けた場合でもトンネルが崩壊せず性能回復が容易に行えること

これに伴い、山岳トンネルの覆工コンクリートに許容されるひび割れの基準は、鉄道トンネルや道路トンネル等の維持管理に関する指針類に詳しく記載されており、性能項目に合わせて幅、深さ、長さ、密度等の基準値が設定されている^{2)～14)}。

例えば、これら指針類に記載されている無筋コンクリートのひび割れ幅の基準値として初期ひび割れでは0.2～0.5mm以上を補修対象とする場合が多く、維持管理段階では0.2mm～2mm程度を健全度を判断する上での境界値とする場合が多く見られる。

このひび割れや剥落について、これまでの研究成果から抑制方法が示されている。例えば、鉄道分野の「山岳トンネル設計施工標準」¹⁵⁾では、ひび割れ発生の主な原因を寒冷地での施工、背面地山の拘束としており、その抑制方法としては、①吹付けコンクリートとの縁切り（アイソレーション）、②コンクリートの品質改良、③ひび割れ誘発目地の設置を挙げている。また、「トンネルコンクリート施工指針（案）」¹⁶⁾では、トンネル貫通後の通風や換気が発生する場合には防風シート等の敷設、供用後の剥落を懸念する場合には、補強材（短繊維等）の混入も有効であるとしている。

しかしながら、このような対策が講じられた後でも、例えば1999年の山陽新幹線の福岡トンネルに始まる一連の剥落や2004年新潟県中越地震における剥落等の事故等が発生した。このため、覆工コンクリートに要求される性能は前述した項目こそ変わらないが時代とともにトンネルを管理する事業者や社会全体からそれぞれの項目に対する質の向上が求められ、許容されるひび割れもより厳しくなっている。

本論文では、このような背景のもとに複雑な条件下にあるトンネルにおける初期ひび割れ発生のメカニズムを明確にし、それを基にした抑制方法の研究を行うこととした。この研究により、更なる初期ひび割れの抑制を行い、社会から要求される性能を満たすような

指標を作成することが可能になると考えている。

なお、本論文における研究では鉄道トンネルを中心に扱っているが、この成果は道路トンネル、水路トンネル等に対しても参照が可能となるよう整理方法等に配慮した。

1.2 研究の目的と構成

本研究では、まず、既往の研究および事例調査からこれまでに施工されたトンネルにおいて初期ひび割れの発生要因とされる材料、施工および環境に関する事項の洗い出しを行う。次に、この各要因を考慮した模型試験により、現在の覆工コンクリートで発生している初期ひび割れのメカニズムを解明する。さらに、このひび割れ発生のメカニズムを表現できる数値解析手法を開発して、実トンネルでは検証が困難な施工条件等でのパラメータスタディを行い、初期ひび割れの発生要因の影響度合いを確認する。また、施工中のトンネルを用いて、施工初期の段階から覆工コンクリートの内部・表面に発生するひずみの計測も行っており、その結果についても記述する。

以上から、下記の3項目を本論文の目的とする。

- (1) トンネル施工中の坑内環境、施工方法、使用材料とコンクリートの内部ひずみ・表面ひずみ、ひび割れ発生の関係を把握して、現在の覆工コンクリートに発生している初期ひび割れの発生メカニズムを解明する。
- (2) 覆工コンクリートに発生するひずみ・応力の発生状況を再現し、かつ初期ひび割れの発生を予測するための手法を確立する。
- (3) (1)、(2)の結果を踏まえ、初期ひび割れの抑制対策を示す。

以下に各章の構成を示す。

「第1章 序論」では、研究の目的と論文の構成について示す。

「第2章 覆工コンクリートの初期性状に関する問題点への対応の現状」では、既往の研究、鉄道トンネルを中心に覆工コンクリートの要求性能の推移、現在の覆工コンクリートに用いられる配合等を整理した。この結果から、初期ひび割れの発生要因として既知である事柄を明確にし、本研究で取り扱うべき課題を明らかにする。

「第3章 覆工コンクリートのひび割れ実態の分析」では、実トンネルを対象に行った調査をもとに、覆工コンクリートの天端部・肩部等の箇所別の初期ひび割れ発生の傾向を把握する。また、現状のトンネルでの施工条件、環境条件による初期ひび割れ発生要因の傾向を調べる。

「第4章 覆工コンクリートの初期性状に関する試験」では、第2章の既往の研究の整理結果および第3章の調査結果を受けて、コンクリートの初期性状に関するパラメータを設定した模型試験を行い、覆工コンクリート内部で発生しているひずみに着目して、覆工コンクリートの初期ひび割れの発生傾向を定性的に明らかにする。

「第5章 覆工コンクリートの初期性状に関する現地計測」では、実際に使用される新幹線トンネルにおいて覆工コンクリートに発生する応力、ひずみの状況について現地計測を行い、実際の環境条件におけるコンクリートの初期性状に関するデータの収集を行う。

「第6章 覆工コンクリートの初期性状に関する解析」では、第4章の模型試験に対して数値解析を行い、初期ひび割れの発生メカニズムを表現できる解析方法およびパラメータの選定方法を示す。また、第5章の施工中のトンネルでの計測結果を用いて数値解析による予測手法の妥当性の検討を行うとともに、様々な坑内環境・施工条件でのパラメータスタディを行い、初期ひび割れの発生に影響のある因子を解明する。

「第7章 初期ひび割れ抑制方法の提案」では、第2章から第6章までを総括し、山岳トンネルにおける覆工コンクリートの初期ひび割れの抑制方法の提案を行う。

「第8章 結論」では、各章で得られたものを取りまとめ、本論文の結論とする。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編 トンネル）, 2007
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル, 1990
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案）, 2000
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル, 2002
- 6) (社) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧, 1993
- 7) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案）, 2002
- 8) 国土交通省：道路トンネル変状対策工マニュアル（案）, 2002
- 9) 日本道路公団：設計要領第三集 トンネル本体工保全編（変状対策）, 1998
- 10) 日本道路公団：道路構造物点検要領（案）, 2002
- 11) 電気事業連合会：水力発電所コンクリート工作物の劣化度判断手法, 1983
- 12) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準, 1992
- 13) 通商産業省資源エネルギー庁：水路トンネル診断マニュアル（案）, 1993
- 14) (社) 日本土木工業協会：実用者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル, 2000
- 15) (独) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準, 2008
- 16) (社) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針, 2000

第2章 覆工コンクリートの初期性状に関する問題点への対応の現状

2.1 概説

本章では、鉄道トンネルおよび道路トンネルにおいて、覆工コンクリートに生じるひび割れの発生原因およびその抑制方法に関する既往の研究をまとめた。また、鉄道・道路・水路の各トンネルにおける覆工コンクリートの要求性能（供用性に関する性能および力学的性能）についてそれぞれまとめるとともに、覆工コンクリートに用いられるコンクリートの配合等について整理した。この結果から、本研究で対象とする初期ひび割れの発生原因と考えられる事柄を把握し、本研究で取り扱うべき課題を明示することで、本研究の目的を明確にする。

2.2 既往の研究

NATM の覆工コンクリートの要求性能およびひび割れ抑制方法を示した資料として最も古いものに「日本トンネル技術協会：NATM 二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書（国鉄大阪工事事務局委託），1983」¹⁾がある。この資料は NATM が導入された初期の段階で覆工コンクリートにひび割れが多く発生したため、この発生原因およびひび割れの抑制対策方法を検討する委員会が発足し、当時の日本トンネル技術協会、日本国有鉄道、日本鉄道建設公団等が中心となり研究を行ったものである。

また、次頁の表-2.1 に示すように、鉄道トンネルの分野では、上記の研究成果に基づく対策の実施によりひび割れが大幅に抑制されたため、それ以降、特筆すべき研究は行われていないが、コンクリート工学、構造工学、トンネル工学等他分野においては、マスコンクリートや繊維補強コンクリート等を対象とした初期ひび割れに関する多くの研究が行われてきた。

以下に、本研究に密接に関連する 2 研究についてまとめた。

- (1) 「日本トンネル技術協会：NATM 二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書（国鉄大阪工事事務局委託），1983」¹⁾
- (2) 「馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究, 山口大学学位論文, 2004」²⁾

表-2.1 コンクリートの初期性状に関する代表的な文献とその推移

年代	日本コンクリート工学協会(JCI)	土木学会(JSCE) トンネル関連以外	国土交通省(旧建設省)	トンネル(NATM)関連
1973年	JCI特集号「コンクリートのひびわれ」 ³⁾			
1975年	ひびわれ調査研究委員会			
1980年	「コンクリートのひびわれ調査・補修指針」 ⁴⁾			
1981年	マスコンクリートの温度応力研究委員会			
1982年	JCI特集号「コンクリートとひびわれ」 ⁵⁾			
1983年				NATMにおける二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書(日本トンネル技術協会) ¹⁾ NATM設計施工指針(案)(旧国鉄) ¹⁶⁾
1984年				NATMにおける二次覆工のひび割れ防止対策に関する研究(村上ら) ¹⁷⁾
1986年	「マスコンクリートのひび割れ制御指針」 ⁶⁾		通達「コンクリート中の塩化物総量規制及びアルカリ骨材反応暫定対策について」	
1988年	「コンクリートのひびわれ調査、補修・補強指針」 ⁷⁾			
1989年	マスコンクリートの温度応力研究委員会	コンクリートライブラリー65号「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)」 ¹²⁾		
1991年		コンクリート標準示方書「維持管理編(試案)」		
1994年	JCI小特集号「硬化コンクリート中の水の役割」 ⁸⁾ 自己収縮研究委員会			
1995年		「コンクリート構造物の維持管理指針(案)」 ¹³⁾		
1996年		「クリープ・乾燥収縮小委員会(308委員会)」		トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説(土木学会) ¹⁸⁾ NATM設計施工指針(旧鉄建公団) ¹⁹⁾
1997年	コンクリートの長期耐久性研究委員会			
1998年	コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会	「コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価研究小委員会(313委員会)」		
1999年	コンクリートの自己収縮研究委員会			
2000年				トンネル安全問題検討会報告書(運輸省鉄道局) ²⁰⁾ コンクリートライブラリー第102号「トンネルコンクリート施工指針(案)」(土木学会) ²¹⁾
2002年		2002年制定コンクリート標準示方書「構造性能照査編」 ¹⁴⁾		トンネルライブラリー第12号「山岳トンネル覆工の現状と対策」(土木学会) ²²⁾ 鉄道構造物等設計標準・同解説【都市部山岳工法トンネル】((財)鉄道総研) ²³⁾
2003年	「コンクリートの初期ひび割れの発生原因と対策」(JCI九州支部) 「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003-」 ⁹⁾		国官技第185号「レディーミクストコンクリートの品質確保について」	
2004年	マスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する研究委員会			トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究(馬場弘二学位論文) ²⁾
2005年	JCI特集号「コンクリート構造物の収縮ひび割れの予測と制御」 ¹⁰⁾			トンネルライブラリー第14号「トンネルの維持管理」(土木学会) ²⁴⁾
2006年				2006制定トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説(土木学会) ²⁵⁾
2007年				鉄道構造物等維持管理標準・同解説「トンネル」((財)鉄道総研) ²⁶⁾
2008年	マスコンクリートのひび割れ制御指針2008 ¹¹⁾	2007年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」 ¹⁵⁾		山岳トンネル設計施工標準・同解説((独)鉄道・運輸機構) ²⁷⁾

- (1) 「日本トンネル技術協会：NATM 二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書（国鉄大阪工事事務局委託）、1983」¹⁾

NATM がわが国で山岳トンネルに採用されて以降、100 件あまりの実績が得られた頃に覆工コンクリートにひび割れが多数発生したため、何らかの対策が必要となり、日本トンネル技術協会や日本国有鉄道、日本鉄道建設公団等が中心に鉄道トンネルを対象とした検討を行ったものである。

この研究では、実態を把握するため単線トンネル 2,792 件、複線トンネル 484 件に対してアンケート調査を行っている。また、福知山線第 1 名塩トンネル西工区では覆工コンクリートの応力・ひずみ計測を行っている。

これらの調査結果から、NATM の覆工コンクリートに要求される性能やひび割れの発生状況等を分析しており、覆工コンクリートに生じるコンクリートの収縮の原因を以下の 3 点に分類している。

- i) セメントの水和熱による収縮
- ii) コンクリートの乾燥収縮
- iii) クリープ

また、ひび割れを誘発する原因を以下の 2 点に分類している。

- イ) 坑内環境（温度、湿度）の変化（冬にひび割れが増加する等）
- ロ) 一次覆工や地山によるコンクリートの外的拘束

次に、ひび割れを抑制するため、坑内温度に応じた対策工として以下の研究を行っている。

- ① 覆工コンクリートの品質改良
- ② 一次支保と覆工コンクリートを絶縁
- ③ 誘発目地の設置
- ④ 皮膜養生の実施

この中で注目すべきことは、ひび割れ発生メカニズム、その原因および要求性能を満たすため（許容されるひび割れの範囲内となるような）の有効なひび割れの対策方法が提案されており、現在に至るまでここで提案された各種の対策方法が基本となり各種トンネルの覆工コンクリートが施工されていることにある。

①は覆工コンクリートの品質を改良しひび割れを抑制する研究であり、膨張剤・収縮緩和剤の使用や高炉セメントの使用、単位水量の低減を検討している。これらの改良されたコンクリートは室内試験で力学的特性等を確認後、上記の福知山線第 1 名塩トンネルにおいて試験施工が行われている。ひび割れはやや改善されるものの単独でひび割れを抑制することは困難であるとしている。

また、②は絶縁する方法として張付け法と吹付け法が検討されている。張付け法は現在

も使用されている絶縁材料（絶縁シート＋不織布）を用いた方法であり、福知山線第2道場トンネルで試験施工が行われ、ひび割れの低減に効果があることが確認されている。

③は、型枠にV字型の目地を取り付けることにより、ひび割れを目地部に集中させる方法である。

④は、型枠脱型後に養生剤を覆工コンクリート表面に散布し養生環境を改善する方法であり、福知山線第2道場トンネル、伊東線新宇佐美トンネル、東北本線大沢田トンネルで試験施工が行われている。若干の効果は確認されたが、養生剤を散布するため坑内の換気の必要性が問題となった。

(2) 「馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究、山口大学学位論文、2004.」²⁾

山陽新幹線の福岡トンネルに始まる一連の剥落事故を受け覆工コンクリートの品質向上が求められるなかで、道路トンネルを対象としてひび割れ抑制法を検討した研究である。

この研究の中で主に取り扱っている事項はコンクリートの品質改良、覆工の打ち重ねに対する施工法、坑内条件とひび割れ発生状況の関係の把握、繊維コンクリートの性能評価等であり、アンケート調査、文献調査、模型実験等を実施している。

コンクリートの品質改良に関する研究として、高炉セメント、骨材の種類（砕石の使用）等がひび割れに与える影響を検討している。主に文献の調査から得た見解であり、以下を結論としている。

- ① 高炉セメントB種は乾燥収縮量が大きくなる傾向があり、ひび割れが発生しやすい。
- ② 良質骨材の枯渇化の進行、山・陸骨材と砕石、砕砂等の使用割合の増加に伴い、単位水量が増加することで、ひび割れが発生しやすくなっている可能性がある。
- ③ 早期の型枠取り外しにより、十分な養生効果は期待できないが、トンネル坑内は温度・湿度ともに安定した状態が確保されている。
- ④ 型枠据付時の押し付けにより、つま部の若材齢コンクリートにひび割れを発生させる危険性がある。

また、覆工コンクリートの打ち重ね時間に関する検討として模型実験を行っており、その結果から打ち重ね時間は当時のコンクリート標準示方書[施工編]²⁸⁾に定められる 25℃以下：2.5時間、25℃以上：2.0時間を基準として問題ないが、締固めが困難な天端部等では1.0時間以内（30分以内が好ましい）に打ち重ねる必要があるとしている。また、通常のコンクリートに流動化コンクリートを打ち重ねる場合は通常のコンクリートを打ち重ねる場合と同様でよいが、鋼繊維補強コンクリートを打ち重ねる場合は、締固めを行う必要があるとしている。

さらに、トンネル坑内環境を考慮した模型実験では、調査から得られた坑内環境条件をもとに実験ケースを設定し、図-2.1に示すような供試体を用いてひずみ計測を行っている。

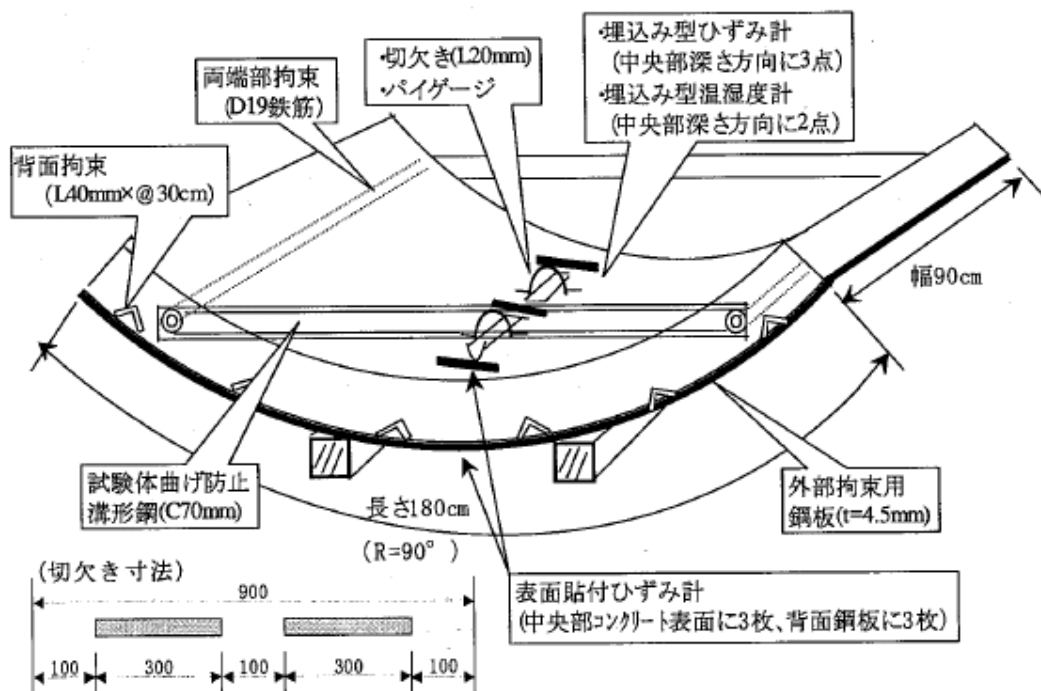


図-2.1 モデル試験体の概要

実験結果から、防水シート敷設によるひび割れ抑制効果が確認され、また、散水養生、膨張材の使用が効果的であることが確認された。このことより、従来どおりの施工法を確実に実施することが重要とし、更なるひび割れ抑制を目指すためには養生対策だけではなく、トンネル坑内環境を十分に考慮する必要があるとしている。

2.3 覆工コンクリートに求められる要求性能とひび割れ抑制方法

2.3.1 要求性能

トンネルコンクリート施工指針（案）²¹⁾では、トンネルの覆工コンクリートは鉄道、道路および水路等の使用目的、使用条件等に適合し、必要な強度を有することを基本として、永く安定性を保ち亀裂、剥落、過大な変形、崩壊等を起こさず、漏水等による侵食や強度の減少等のない耐久性のあるもので、かつ温度変化、乾燥収縮によるひび割れの少ないものでなければならないとしている。

また、トンネル標準示方書〔山岳工法・同解説〕²⁵⁾では、覆工コンクリートはトンネルの使用開始後にこれを改修することは非常に困難であるので、将来、改修の必要のないように、十分に配慮しなければならないとしている。そして、覆工の役割・機能として、供用性および強度特性について、以下のように示している。

ア 供用性については以下の4点である。

- ① 地下水等の漏水の少ない、水密性のよい構造物にする

- ② 使用中の点検、保守等の作業性能を高める
- ③ 水路トンネルの場合、粗度係数を向上させ使用の効率を高める
- ④ トンネル内の架線・照明・換気等の施設を保持する

イ 強度特性については以下の４点である。

- ① トンネルの変形が収束しない状態で覆工コンクリートを施工する場合には、トンネルの安定に必要な拘束力を与える
- ② 覆工を施工した後、水圧・上載荷重等によって外力が発生する場合、これを保持する
- ③ 地質の不均一性、支保工の品質のばらつき、ロックボルトの腐食等の不確定要素を考慮し、構造物の安全性を増加させる
- ④ 使用開始後の外力の変化や地山、支保工材料の劣化に対し、構造物としての耐久性を向上させる

また、覆工の構造設計上の位置付けについては、力学的機能を付加させない場合と力学的機能を付加させる場合に大別されるとしている。

力学的機能を付加させない場合には、上記の供用性を主な目的として施工される。一方、力学的機能を付加させる場合は、上記の強度特性も有するものであり、以下のような場合が挙げられる。

- ① 土圧・水圧が作用すると考えられる場合（低土被りによりグラウンドアーチの形成が期待できない場合や地下水位の復水により水圧が発生する場合）
- ② 交通振動や将来、切土、盛土等の環境条件の変化による付加荷重等の外力が作用する場合
- ③ 膨張性地山のように、地山変形の収束前に覆工を打設せざるを得ない場合（地山の荷重・変形を覆工で抑えようとする場合）
- ④ 双設トンネルや近接施工が計画されている場合（施工の影響でトンネル周辺の応力状態のバランスが崩れる場合）

力学的機能を付加させる場合には、覆工コンクリートの巻厚、強度、鉄筋量等について、骨組み解析・FEM 解析等を用いて決定する。ここで、覆工に作用する荷重として、通常はテルツァギー等の緩み土圧を用いることが多い。

また、トンネル掘削に伴う湧水により、地下水位の変動が生じ、地表面沈下等によりトンネル周辺環境に悪影響を与えると想定される場合は、覆工を防水型とすることがある。この場合、覆工に水圧が作用するため、形状・強度等に留意し設計しなければならない。

以下に、各種トンネル（鉄道・道路・水路）における要求性能について示す。

(1) 鉄道トンネル

鉄道トンネルにおいては、山岳トンネル設計施工標準・同解説²⁷⁾に、一般地山の場合、覆工は支保工の応力状態によりその機能を判断する必要があるが、以下の機能を付加する

目的で設計しなければならないとしている。

- ① 一次支保の安全率の向上
- ② 内装機能
- ③ 保守管理機能
- ④ トンネル内施設の保持機能

また、覆工の耐久性は、気象条件、漏水等の影響を受けるので、安全な供用の確保のため、影響要因を検討して、適切な対応が必要としている。

覆工コンクリートは一次支保の変位が収束してから打設するのが原則であるが、以下に示す場合は、力学的機能を考慮し、別途設計が必要であるとしている。

- ① 土砂地山等で土被りが小さく、グラントアーチの形成が期待できない場合
- ② 地下水の変動等により、大きな水圧が作用する場合
- ③ 他構造物との近接施工等により荷重が作用すると考えられる場合や、トンネル周辺の切取、盛土等により上載荷重が供用後変化すると想定される場合
- ④ 地形等による偏圧が作用する場合
- ⑤ 膨張性土圧、塑性変形等が大きく、一次支保で変位が収束せず、覆工コンクリートにより土圧に対抗せざるを得ない場合
- ⑥ 一次支保で変位は収束して周辺地山の安定性は確保されているが、一次支保耐力の限界に近いことが予想される場合

これらの場合、当初から荷重を特定することが可能な場合には必要な材質・巻厚のほか、所要の力学的機能を備えた二次覆工を設計しなければならないとしている。

(2) 道路トンネル

道路トンネルにおいては、設計要領第三集第9編 トンネル²⁹⁾に、トンネル内の安全性確保のため、内空断面保持機能として、所要の道路幅員および建築限界を満足するだけでなく、換気・非常用・照明・内装・排水・標識等の設置空間のほか、これらの保守点検のための監視員通路の設置空間も確保しなければならないとしている。

また、NATMは吹付けコンクリートおよびロックボルトの支保構造のみでトンネルを安定させることが原則であり、これにより長くトンネルの安定を保てる場合には、覆工は不要となるが、吹付けコンクリートおよびロックボルトの永久構造物としての信頼性が未だ確認されていないこと等から、一般に、覆工はトンネルの安定を確保するための最終的段階として位置付けられ、以下のような設置目的を有しているとしている。

- ① 地質の不均一性（経時劣化・緩み・水圧上昇等）、支保工材料の品質のばらつき、ロックボルトの腐食等の不確定要素を考慮し、構造物としての安全率を増加させる
- ② 使用開始後の外力の変化や地山・支保工材料の劣化に対し、構造物としての耐久性を向上させる

- ③ 覆工を施工した後、水圧・上載荷重等によって外力が発生する場合、これを支持する
- ④ トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工する場合には、トンネルの安定に必要な拘束力を与える

(3) 水路トンネル

水路トンネルにおいては、土地改良事業計画設計基準 設計 水路トンネル³⁰⁾に、覆工の機能は無圧トンネル（トンネル内部が水で満たされず圧力の掛からないトンネル）と圧力トンネル（トンネル内部は水で満たされ、圧力が掛かったトンネル）に分けて、また、無圧トンネルにおいては、矢板工法と吹付け・ロックボルト工法に分けて示している。

まず、矢板工法による無圧トンネルの場合は、覆工とは、トンネル内空断面と地山間または支保工間を充填する無筋または鉄筋コンクリート、あるいは直接地山に吹付けられたコンクリート等のことをいい、以下の機能を備えたものとしている。

- ① 矢板または支保工等と共同して地圧、水圧、その他の外力を支えて、長く所定の内空断面形状を維持する
- ② 地山の物理的、化学的風化作用を阻止または軽減する
- ③ トンネル内外面間の水の流通を防止する
- ④ トンネル内周面の粗度を減少し、可能な限り内壁断面の縮小または水頭損失の軽減が図れる
- ⑤ トンネルの維持管理を容易にする

次に、吹付け・ロックボルト工法による無圧トンネルの場合の覆工機能は、矢板工法による場合と同じであるが、地質の不均一性、支保工の品質のばらつき、ロックボルトの腐食等の不確定要素を考慮し、構造物としての安定性を高める機能を備えたものとしている。

また、圧力トンネルの場合の覆工機能は、矢板工法による無圧トンネルで記述した事項に加えて、圧力水路では外水圧のほかに内水圧も加わること、また、グラウトの注入圧に対しても、構造物としての安定性を保持した機能を備えたものとしている。

2.3.2 ひび割れ抑制方法

トンネルコンクリート施工指針（案）²¹⁾では、覆工コンクリートのひび割れ抑制方法として、覆工コンクリートの材料、配合、養生方法、背面拘束低減材・防水材、ひび割れ誘発目地、補強材を挙げている。しかし、これらの抑制方法には、いずれも決定的なものがないのが現状であり、実際には対処可能な方法をいくつか併用することが望ましいといえる。

以下にそれぞれの方法について示す。

(1) 材料

- ① できるだけ水和熱の少ないセメントの使用

② ひび割れ低減のために混和材料を使用

①については、中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント等（JIS 規定）のほかにも、混合セメントに別の混合材を添加した 3 成分系セメントも普通ポルトランドセメントと比べ水和熱を抑える効果がある。

覆工コンクリートは巻厚が 30cm～50cm 程度と薄いので、低発熱形セメントによる効果はマスコンクリートほどではないが、ある程度のひび割れ低減は期待できる。しかし、初期強度の発現が普通ポルトランドセメントと比べて遅いため、脱型時期を十分検討する必要がある。

②については、水和熱に対しては、高炉スラグ微粉末（水和熱の発生速度を遅らせる効果）、フライアッシュ（水和熱による温度上昇を小さくする効果）、水和熱抑制剤（特殊な溶解性を利用して、温度上昇速度と温度上昇量を減少させる効果）を用いることで水和熱を低減することができる。

(2) 配合

コンクリートの発熱量は、単位セメント量にほぼ比例し、乾燥収縮量は、単位水量を少なくすることで低減することができるので、所要の品質を満足する範囲内で、単位セメント量、単位水量をできるだけ少なくすることが必要である。単位セメント量や単位水量を減少させる方法としては、流動化剤を用いる方法がある。

(3) 養生方法

覆工コンクリートは、明かり構造物と比べて、脱型時期が早いために型枠存置による十分な養生効果は期待できない。しかし、トンネル内は、坑口付近を除き一般に湿度が高く、温度も安定し、覆工背面が地山に面しているので外気に露出しているのは内側の一面のみであること、また、トンネル内は日照作用もなく、風等の影響もほとんど受けない（貫通前）ため、湿潤状態に保たれていると見なして、一般的には付加的な養生は行われていないのが現状である。

しかし、貫通後の通風や換気等により環境が変化する場合には、防風シートを張る等の適切な対策が必要である。また、温度応力によるひび割れの発生が特に問題となる場合には、部材内外の温度差が大きくならないよう、また部材全体の温度降下速度や乾燥収縮が大きくならないよう、トンネル坑口に養生扉を設けるか、あるいは打設スパン区間の前後を養生シートで覆う等の配慮が望ましい。

(4) 背面拘束低減材・防水材

背面拘束低減材および防水材は、支保工と覆工との間を縁切りし、収縮変形を拘束しないようにして、ひび割れを制御できる。

防水シート材料としては、ポリ塩化ビニル（PVC）、エチレン共重合体ビチューメント（ECV）、エチレン酢酸ビニル共重合体（EVA）の 3 種類が一般的である。そのうち使用実績が多いものは EVA（厚さ 0.8～2.0mm 程度）と、裏面緩衝材（不織布）3mm 厚程度の複合積

層構成のものである。

また、背面拘束低減材には張付け工法と吹付け工法があり、張付け工法は、0.4mm 厚程度の EVA シートや、1mm 厚程度の発泡ポリエチレンシートが多用されている。使用の初期段階では 0.2mm 厚の塩化ビニル製であったが、ひび割れ防止を確実にするため、厚手のものが用いられるようになった。

吹付け工法は、発泡モルタルや軟質ゴム、アスファルト等を用い、試験的に使用され、効果は確認されているが、高価なことからトンネル内環境を著しく悪化させること等のため、ほとんど使われていないのが現状である。

(5) ひび割れ誘発目地

アーチ上半部には軸方向に、また打設スパンが長い場合には直角方向にひび割れが生じやすく、特に背面拘束低減材がない場合は顕著である。

材料や配合上の対策でひび割れを制御することが難しい場合には、一定間隔で断面欠損部を設け、その部分でひび割れを誘発し、その他の部分での発生を制御するとともに、発生箇所の事後処理を容易にする方法がひび割れ誘発目地である。覆工コンクリートの打設スパンが長い場合には、トンネル軸方向あるいは直角方向に誘発目地を設ける。

誘発目地の間隔は、断面寸法、巻厚、打込み温度等に大きく影響されるので、これらを考慮して決める必要があるが、軸方向に直角で設ける場合は、インバートから天端までの高さを H として、 $H \sim 2H$ 程度を目安とする。

移動式型枠の長さは工程、曲線部の曲率、打設能力等を考慮して決定するが、一打設長を長くすると収縮ひずみによるひび割れが発生しやすくなるので、9～12m が一般的である。しかし、これ以上長い型枠が使用されることもあり、その施工事例として、全長 18m の長スパン全断面スライドフォームに油圧脱着式強制目地装置(クラック防止用)を取り付け、中間部に深さ 200mm の盲目地を設けてひび割れを集中させ、覆工面のひび割れ発生を抑制できたことが報告されている。¹⁹⁾

この方法は、経済的でひび割れを少なくする効果はあるが、確実性に欠ける点がある。また、ひび割れ誘発後、誘発部からの漏水防止として、目地部の導水工や覆工背面において防水シートの設置を行う等、適切な対策を検討する必要がある。

(6) 補強材

ひび割れが有害な幅に拡大しない限り、覆工コンクリートの機能に影響を及ぼすことはないので、ひび割れ幅の制御方法として、鉄筋の他、鋼繊維、耐食性に優れたビニロン繊維、ポリプロピレン繊維やアラミド繊維等の短繊維を混入する方法がある。繊維を混入する場合は、配合や強度特性について確認が必要である。

(7) その他

上記の抑制方法以外にも、トンネル標準示方書〔山岳工法・同解説〕²⁵⁾では、コンクリート打設環境の改善として、坑内温度や骨材温度等の低下によるコンクリートの練上り温

度を低下させる方法、山岳トンネル設計施工標準²⁷⁾では、コンクリート施工方法の改良として、覆工スパンの一打設長を短くする方法や、打設方法の改善（材料分離を避けるため、打込み箇所を天端や特定の箇所からにせず、適切な位置に設けた作業窓からも行う等）を挙げている。

2.4 覆工コンクリートの配合と強度

現在、鉄道トンネルの覆工に用いられるコンクリートの配合は山岳トンネル設計施工標準・同解説²⁷⁾が基準となっている。この指針では一般地山におけるコンクリートの配合を表2-2のように定めている。

表-2.2 鉄道トンネルの配合例²⁷⁾

設計基準強度 (MPa)	セメントの種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの 範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	耐久性から定める 最大セメント比 (%)
18	普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントB種	40	15±2.5	4.5±1.5	60

なお、寒冷地のトンネルでは、坑口から200mの間は、配合を寒冷地仕様とする（空気量を増加させ、最大水セメント比を58%以下に減少させる等）としている。また、天端の充填をよくするため天端付近のコンクリートに流動化剤を添加する場合がある。

一方、道路トンネルの覆工に用いられるコンクリートの配合はコンクリート施工管理要領³¹⁾が基準となっており、表-2.3のように定めている。

表-2.3 道路トンネルの配合例³¹⁾

材齢28日における 圧縮強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最 大寸法 (mm)	セメントの 種類	最小単位 セメント量 (kg/m ³)	最大塩化物 含有量(C1-) (g/m ³)
18	15±2.5	4±1.5	40	N, BB	270	300

2.5 覆工コンクリートにおける初期ひび割れの発生原因と発生パターン

一般に、覆工コンクリートの初期ひび割れは、単独の要因で発生している場合もあるが、複数の要因の組み合わせにより発生している場合も多く、また、その要因は、材料・環境に起因するものと施工に起因するものに分類される。これらの要因ごとにさらに細分した発生原因と発生パターンをまとめると、以下のようになる。

(1) 材料・環境に起因するひび割れ

ア コンクリート材料

コンクリート材料に関わる要因のうち、次に示すセメントや骨材を使用した場合にはひび割れが発生しやすい。

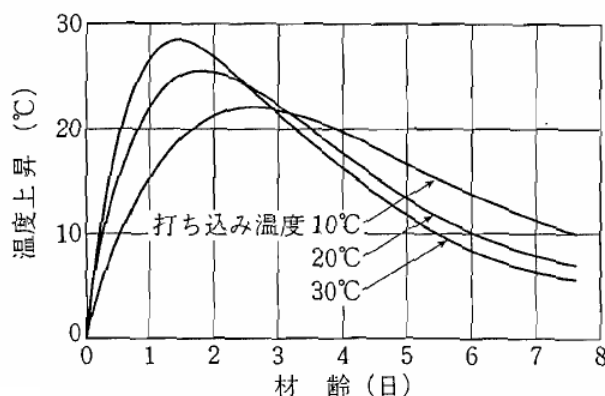
- ① 異常凝結を示すセメント、水和熱の大きなセメント
- ② 泥分を多く含む骨材、アルカリ骨材反応を示す骨材

イ コンクリートの水和熱や温度変化

覆工コンクリートは、トンネル軸方向・周方向とも、厚さに比べて延長が長く、また、地山側と吹付けコンクリートが接しているため、水和熱による膨張ひずみに加え、温度の低下や乾燥等に起因する収縮ひずみにより、コンクリート自体の変形が拘束されやすい構造である。そのため、コンクリートの膨張・収縮挙動が拘束されて圧縮・引張応力が生じ、その結果、ひび割れが発生する。

i) 温度応力

図-2.3 にコンクリートの打込み温度の違いによる材齢と温度上昇の関係を示す。これによると、打込まれたコンクリートは、セメントと水が反応することによる水和熱で温度上昇した後、外気温まで降下し、この温度降下の過程で、覆工コンクリートと吹付けコンクリートの間に拘束力が作用することによりひび割れが発生する。



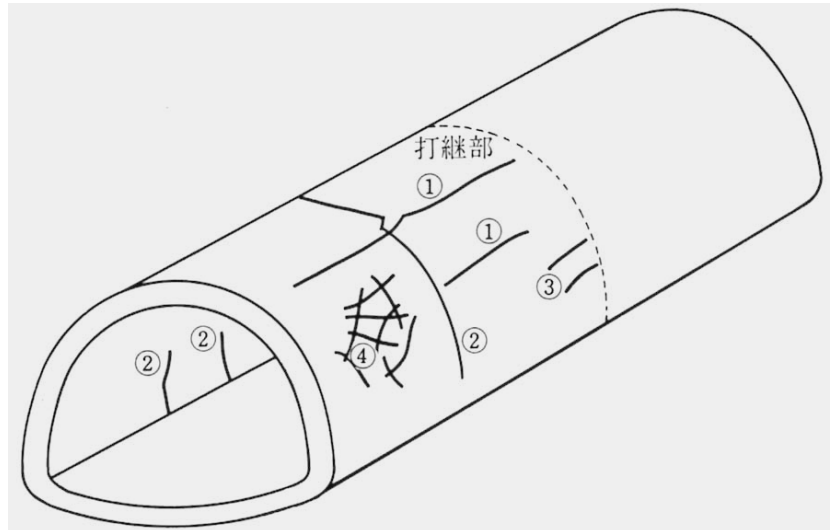
部材の温度上昇(打込み温度の影響) (普通セメント,
単位セメント量 300kg/m, 1.2m 壁体の場合)

図-2.3 打込み温度差による温度上昇履歴³²⁾

ii) 乾燥収縮

インバートコンクリートが施工されていると、覆工コンクリートがインバートに拘束され側壁部に横断方向（トンネル周方向）のひび割れ発生危険性が高くなる。

図-2.4 に示す覆工コンクリートに発生するひび割れのうち、主に温度収縮ならびに乾燥収縮による変形が拘束されることが要因で生じるひび割れパターン（①～④）を示す。



- ① 軸方向へ直線的に伸びる
- ② 軸直角方向に伸びる
上向きに規則的間隔で生じる
全周にわたる場合もあり
- ③ 継ぎ目近傍で軸方向に伸びる
短いが規則的間隔で発生
- ④ ランダム方向に亀甲状あるいは網目状に分布

図-2.4 材料・環境に起因するひび割れのパターン²¹⁾

材料・環境に起因するひび割れは、覆工の機能を著しく損なうには至らない場合がほとんどであるが、複数のひび割れが交差して3次元的に囲む場合には剥落の危険性が懸念される。また、これらの中には断面を貫通して発生するひび割れもあるため、漏水防止や耐久性の観点から適切な対策を講じる必要がある。また、図-2.4の①のひび割れのように、トンネル軸方向に伸びるひび割れについては、外力の作用によって生じるひび割れの発生パターンにも類似しており、将来、覆工の構造耐力の低下につながることも考えられる。従って、これらのひび割れの発生を防ぐことは、非常に重要である。

(2) 施工に起因するひび割れ

ア 早期の脱型

型枠を早期に脱型すると、覆工コンクリートが自重に耐えられず、主にトンネル天端付近に縦断方向のひび割れが発生することがある。

イ 施工

覆工コンクリートの型枠は、コンクリートの漏出を防止するために、一般に既設コンクリート側で10cm程度ラップさせて据付けを行っている。型枠はコンクリートを繰り返し打込むと多少なりとも変形を生じるので、既設側とつま側の型枠の曲率が異なっている。そ

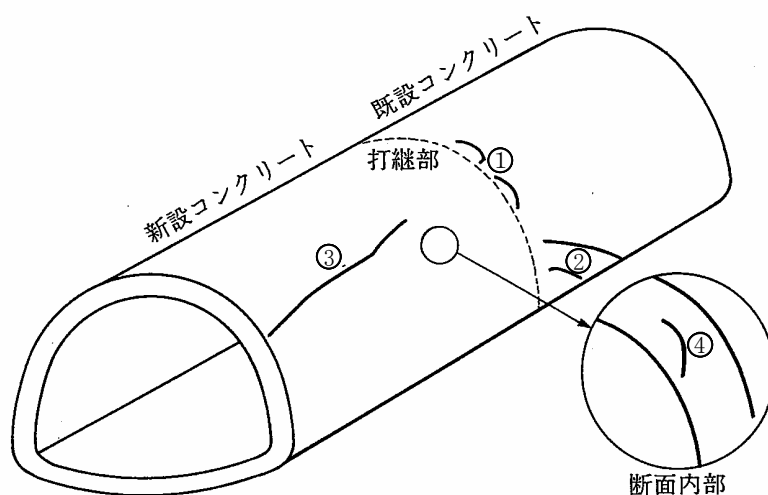
のため、型枠据付け時に型枠と既設コンクリートとの接触により覆工コンクリートにひび割れが発生することがある。また、ジャッキ操作ミス等により過度の接触、押上げが起る場合もある。このひび割れは、打継ぎ目と連続していることが多く、コンクリート片が剥落しやすい形状であり、供用後に通行車両の安全を損なう可能性が高く、問題となりやすい。特に、既設側のコンクリート背面に空隙が存在する場合には、ひび割れが発生する危険性が高くなるので注意が必要である。

また、脱型時においてもジャッキ操作ミス等により過度な圧力が覆工コンクリートにかかる場合もあるので、注意が必要である。

ウ 背面拘束

背面地山との摩擦により、コンクリートに生じるひずみに内空側と背面側とで差が生じるため、ひび割れが発生する。これについては、防水シートおよび不織布を介在させることによりひび割れを抑制できることが確認されている。²¹⁾

図-2.5 に覆工コンクリートに発生するひび割れのうち、施工方法が主な要因で生じるひび割れパターン（①～④）を示す。



- ① 型枠の接触面に沿って発生
不均等な脱型の過度の圧力等に起因
- ② 型枠を据付ける際の反力が既設コンクリートの下端部に作用することに起因
- ③ コールドジョイントに起因
- ④ 断面内部に局所的に伸びる
型枠の沈下、型枠とコンクリートとの付着に起因

図-2.5 施工に起因するひび割れのパターン²¹⁾

施工に起因するひび割れについても、覆工の機能を著しく損なうには至らない場合がほとんどであるが、複数のひび割れが交差して3次元的に囲む場合には剥落の危険性が懸念される。近年は、施工に起因するひび割れの対策が適切に講じられるようになっており、

徐々に問題は解消されつつあるものと考えられる。

2.6 まとめ

本章では、NATMにおける初期ひび割れの発生要因とその抑制方法に関する既往の研究と知見を示した。また、覆工コンクリートに求められる性能（要求性能）をまとめるとともに、初期ひび割れの発生要因と考えられる諸要因と、初期ひび割れの抑制方法の現状を示した。

これらの結果より、覆工コンクリートの初期ひび割れの発生要因とその抑制方法の現状は、以下のように整理できる。

- (1) NATMにおける初期ひび割れの発生メカニズムとその抑制方法に関する研究の基礎は、NATM導入初期に国鉄が中心となって取りまとめた「NATM二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書」（1983）¹⁾であり、この成果を踏まえて防水シートの施工等が標準化され、当時多数発生していた初期ひび割れが大幅に抑制された。
- (2) その後、覆工コンクリートの材料や配合、養生方法、背面拘束低減材、ひび割れ誘発目地、補強材等の様々なひび割れ抑制方法が提案・実用化されている。その結果、初期ひび割れをさらに抑制できるようになったものの、決定的な対策法が確立できておらず、完全な抑止には至っていないのが現状である。
- (3) 初期ひび割れの多くは、覆工の機能を著しく損なうものでないものと考えられるが、発生形態によっては、将来のコンクリート片の剥落（ひび割れに囲まれた場合等）や覆工の構造耐力の低下（トンネル軸方向に長く伸びる場合等）に繋がることも考えられるので、その防止は非常に重要である。
- (4) 初期ひび割れの更なる抑制のためには、特に、コンクリートの水和熱や乾燥収縮等の環境に関係する諸要因とひび割れの発生との関係を明確に把握し、コンクリートの固化段階におけるひび割れ抑制対策法を構築する必要がある。

以上の現状をふまえて、本研究では、まず、初期ひび割れの発生実態を調査した上で、模型試験、現地計測および数値解析により、これらの因果関係を明確にする。それとともに、数値解析による初期ひび割れの定量的な予測手法の確立と発生抑制手法を提案することを目的として実施することとする。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：NATM 二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書（国鉄大阪工務局委託），1983. 3
- 2) 馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究，山口大学学位論文，2004
- 3) (社) 日本コンクリート工学協会：「特集 コンクリートのひび割れ」，コンクリート工学，1980
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査・補修指針，1980
- 5) (社) 日本コンクリート工学協会：「特集 コンクリートとひび割れ」，コンクリート工学，1982
- 6) (社) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，1986
- 7) (社) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針，1988
- 8) (社) 日本コンクリート工学協会：「小特集 硬化コンクリート中の水の役割」 コンクリート工学，Vol. 32, No. 9, PP5-55, 1982. 9
- 9) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2003-，2003. 6
- 10) (社) 日本コンクリート工学協会：「特集 コンクリート構造物の収縮ひび割れの予測と制御」，コンクリート工学，2005. 5
- 11) (社) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008
- 12) (社) 土木学会：「コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）」，コンクリートライブラリー65 号，1989. 8
- 13) (社) 土木学会：「コンクリート構造物の維持管理指針（案）」，コンクリートライブラリー81 号，1995. 10
- 14) (社) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002. 3
- 15) (社) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2008. 3
- 16) 日本国有鉄道：NATM 設計施工指針（案），1983. 3
- 17) 村上温，宮田尚彦，中島順雄，板井則之：NATM における二次覆工のひび割れ防止対策に関する研究，鉄道総合研究報告，No. 1255，1984. 3
- 18) (社) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編・同解説]，1996. 7
- 19) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針，1996. 2
- 20) 運輸省鉄道局：トンネル安全問題検討会報告書，2000
- 21) (社) 土木学会：「トンネルコンクリート施工指針（案）」，コンクリートライブラリー102 号，2000. 7

- 22) (社) 土木学会：「山岳トンネル覆工の現状と対策」，トンネルライブラリー第 12 号, 2002. 9
- 23) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説「都市部山岳工法トンネル」，2002. 5
- 24) (社) 土木学会：「トンネルの維持管理」，トンネルライブラリー第 14 号, 2005. 7
- 25) (社) 土木学会：2006 年制定トンネル標準示方書〔山岳工法・同解説〕，2006.
- 26) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説「トンネル」，2007. 1
- 27) (独) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008
- 28) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.
- 29) 日本道路公団：設計要領第三集第 9 編 トンネル, 1998. 2
- 30) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 設計 水路トンネル, 1996
- 31) 例えば，東日本高速道路（株）：コンクリート施工管理要領，（株）高速道路総合技術研究所，2008. 8
- 32) (社) 日本鉄道建設業協会：山陽新幹線トンネル覆工技術に関する検討報告書, 2000

第3章 覆工コンクリートのひび割れ実態の分析

3.1 概説

第1章および第2章で述べたように、現在、鉄道の山岳トンネルの覆工コンクリートは、背面シート等による初期ひび割れ対策が講じられており^{1),2)}、NATM導入当初に比べて初期ひび割れの発生は大幅に減少している。しかし、残念ながらこれを完全に抑止するには至っておらず、第1章でも述べたとおり近年では、次のような観点から一層の初期ひび割れの抑制が求められるようになっている。

- ① 1999年の山陽新幹線福岡トンネルに始まる一連の剥落事故等を受け、初期ひび割れの発生防止をはじめとする覆工コンクリートの品質向上が求められている
- ② ひび割れの多くが、外力が作用した場合に生じるトンネル縦断方向に伸びるひび割れに類似しており、維持管理における健全度評価を困難なものとしている

このような状況の下で、覆工コンクリートの初期ひび割れの実態を体系的に整理した研究事例が皆無であったことから、本論文ではまず、その発生の実態を把握するため、施工実態調査を行った。

施工実態調査の対象は、東北新幹線盛岡以北でNATMによって施工された3トンネル(岩手、三戸、八甲田)、2,571スパンである。3.2節ではひび割れの有無と発生状況(部位、方向、幅、長さ、位置、形態)を整理し、初期ひび割れの発生実態の全体的な傾向を明らかにする。さらに、3.3節で上記3トンネルの中で最も新しく施工された八甲田トンネルを対象とし、縦断方向に生じるひび割れに着目して、ひび割れの発生と打設月、水セメント比、単位水量、打設温度、坑内温度、坑内湿度との関係を各々分析する。

3.2 東北新幹線におけるひび割れ実態調査

コンクリート打設日報やひび割れ展開図等の施工実績資料から覆工コンクリートのひび割れ発生状況の全体的な傾向を把握するため、ひび割れ発生頻度、発生部位等について調査した。

3.2.1 調査方法

対象とした施工区間は、東北新幹線の岩手・三戸・八甲田の3トンネルである。抽出概要を表-3.1に示す。なお、調査の目的上、鉄筋コンクリートおよび繊維補強コンクリート区間は除外して、無筋コンクリート区間を対象に検討した。

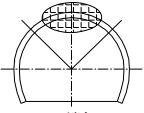
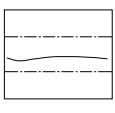

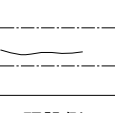
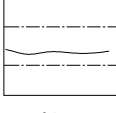
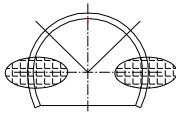
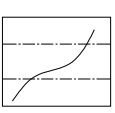
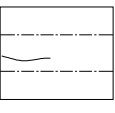
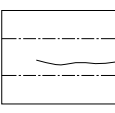
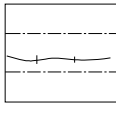
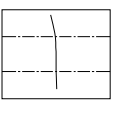
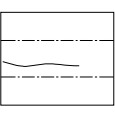
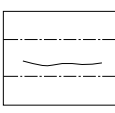
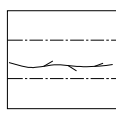
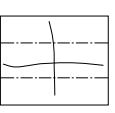
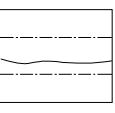
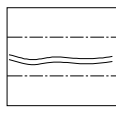
覆工コンクリートに発生したひび割れの特徴を整理するため、表-3.2に示すようにひび割れ発生の抽出条件を設定した。抽出条件は、ひび割れは幅0.2mm以上を対象とし、発生状況としては、発生部位、方向、長さ、発生位置、発生形態とした。展開図に記録されたひび割れは複雑で、短いひび割れの点状や、分類が困難なひび割れパターンが見られるが、スパンに占めるひび割れのうち、主なひび割れに着目し、発生状況について分類した。ま

た、コールドジョイントの疑いがあるひび割れは、その旨を記録し、データとしては除外した。また、調査対象スパンに発生したひび割れの状態を分類すると、1本に伸びるもの、交差するもの、枝分かれするもの、2本ないし3本のひび割れがほぼ並行に発生するものに概ね分類される。このひび割れの発生状況を発生形態として4パターンに分類し整理した。

表-3.1 施工区間の抽出概要

トンネル名		工区名	全長 (m)	無筋コンクリート 区間長(a) (m)	打設データ 抽出区間長 (b) (m)	打設データ 抽出スパン数	無筋コンクリート区 間長に対する 抽出割合 $b/a \times 100 (\%)$
東北新幹線	岩手 トンネル	御堂 工区	3,840	3,686	3,686	351	100.0
		摺糠 工区	4,110	3,667	2,326	222	63.4
		火行 工区	3,540	3,520	3,520	336	100.0
		小繋 工区	3,610	3,550	645	54	18.2
		女鹿 工区	3,720	2,161	1,597	234	73.9
		一戸 工区	3,990	3,227	3,007	286	93.2
		鳥越 工区	2,998	2,961	2,961	248	100.0
	三戸 トンネル	北工区	4,125	4,017	786	334	19.6
		南工区	4,125	4,014	3,261	68	81.2
	八甲田 トンネル	築木 工区	4,530	4,017	786	438	19.6
合 計			38,588	34,820	22,575	2,571	(平均) 66.9

表-3.2 ひび割れ発生状況の抽出条件

覆工ひび割れ(ひび割れ幅0.2mm以上)				
発生部位	方向	長さ	発生位置	発生形態
 天端部	 縦断ひび割れ	 1/4スパン長以下	 既設側	 パターン1
 側壁部	 斜めひび割れ	 1/4～1/2スパン長	 つま側	 パターン2
	 横断ひび割れ	 1/2～3/4スパン長	 中央	 パターン3
	 交 差	 3/4～1スパン長		 パターン4

3.2.2 調査結果

ここでは、ひび割れ発生状況の概要について示す。ひび割れ発生時の坑内環境やコンクリートの打設条件を絞り込んだ集計結果は3.3節で検討する。

(1) ひび割れ発生率とひび割れ発生部位

変位収束を確認した後に覆工コンクリートを打設したスパンを対象にひび割れの発生割合とひび割れ発生部位を調査した。図-3.2に全スパンに占めるひび割れ発生部位の分布を示す。ひび割れが発生したスパンは、2,571スパン中967スパンであり、その割合は37.6%であった。ひび割れが発生したスパンのうち、天端部のみで発生しているスパンは、534スパンであり、その割合は55.2%であった。天端部に発生しているひび割れは、剥離・剥落につながる恐れがあることから、ひび割れの発生を抑制するための取り組みは重要である。

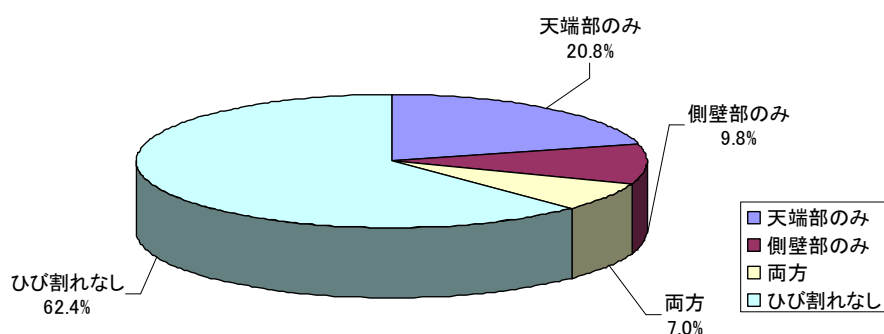


図-3.2 ひび割れ発生割合と発生部位

(2) ひび割れ発生部位と発生方向

図-3.3にひび割れの発生部位（天端部、側壁部）毎にその各発生方向の占める割合を示す。これより天端部では、縦断ひび割れの占める割合が84.8%を占め、側壁部では、横断ひび割れの占める割合が48.0%に達している。

天端部に発生するトンネル縦断方向のひび割れは、外力によるひび割れ発生形態と類似していることから、維持管理段階における健全度の判断が困難なものとなっている。そのため、建設初期あるいは、供用初期の段階でこれらの状況を的確に記録することが重要である。以降の検討では、発生事例が多い天端部に発生するトンネル縦断方向のひび割れ（以下、このひび割れを「縦断ひび割れ」と呼ぶ）を中心に整理する。

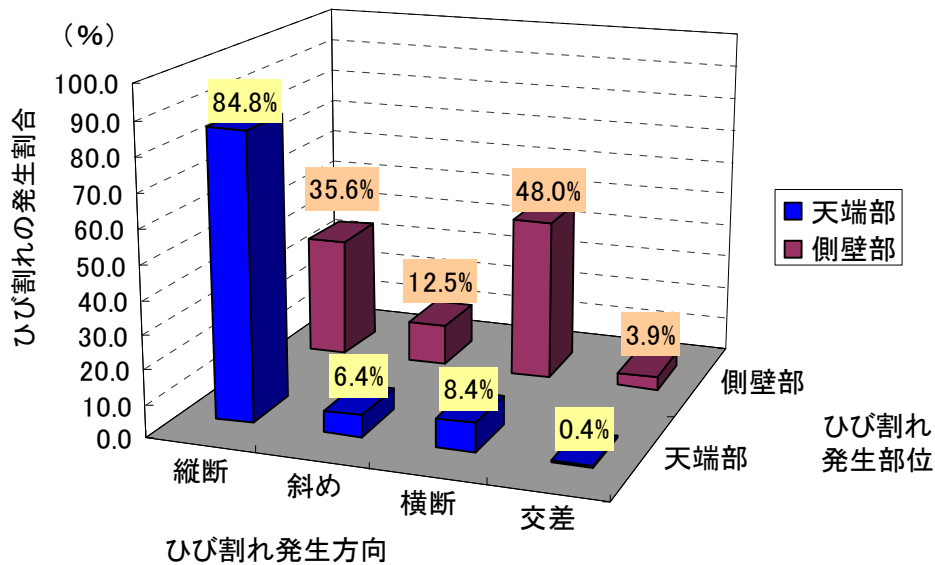


図-3.3 ひび割れ発生部位に占める発生方向の割合

(3) 縦断ひび割れの発生状況

ここでは、縦断ひび割れをひび割れ長さ、発生形態、発生箇所の観点で整理する。

図-3.4 は、ひび割れ長さの割合を示したものであり、表-3.2 の 4 区分で整理した。これによれば、1/2 スパン長以上 (1/2～1 スパン長) に発生しているものが 64.7%、3/4～1 スパン長のものが 41.6%であり、延長の長いひび割れが多い。

図-3.5 は、縦断ひび割れが発生したスパンにおける、発生形態の占める割合を示したものであり、パターンを表-3.2 の 4 区分で整理した。最も割合が高いのは、パターン 1 の一本に伸びたひび割れで 65.8%であった。次いでパターン 3 の枝分かれするひび割れで 22.8%、パターン 2 とパターン 4 は、それぞれ 5.8%、5.6%であった。

図-3.6 は、縦断ひび割れの発生位置の割合を示したものである。スパンを縦断方向に既設側、中央部、つま側に区分し整理した。これより、ひび割れ発生位置は既設側とつま側に多く見られ、中央部のみの発生は 5%未満と少ない。

一般に地山の緩みによる鉛直土圧によるひび割れは、天端部の縦断方向に連続して発生すると言われている^{3),4)}。対象とした縦断ひび割れは、外力によるひび割れの発生状況と類似しているものが多く見られることから、維持管理段階における健全度の判断や剥離・剥落の防止のためにも、これらのひび割れを抑制するための取り組みが重要であると言える。

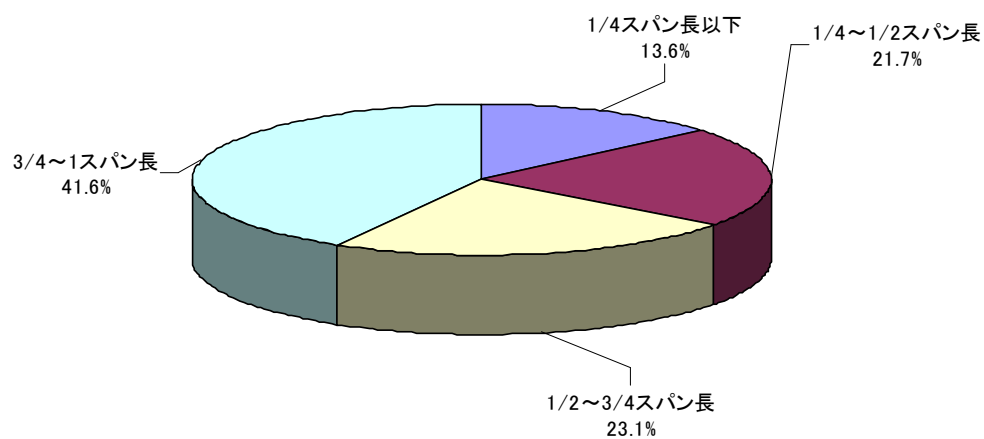


図-3.4 ひび割れ長さの割合

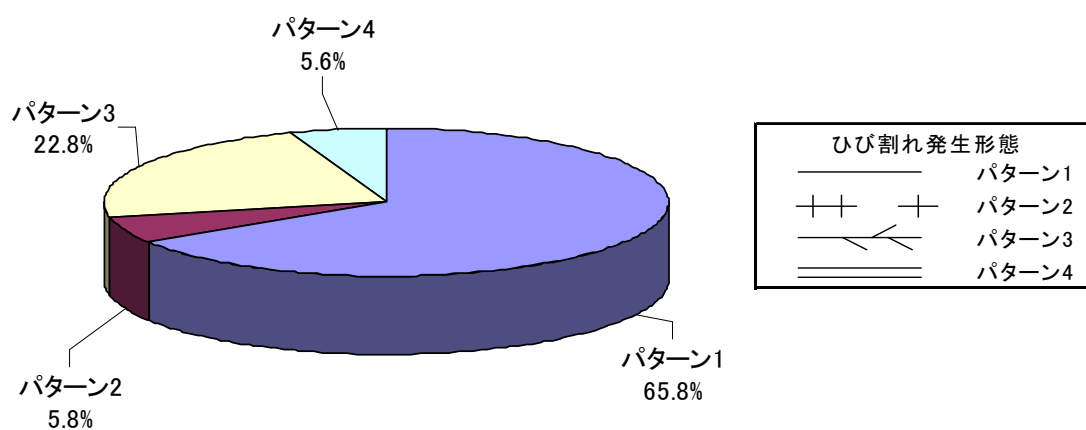


図-3.5 ひび割れ発生形態の割合

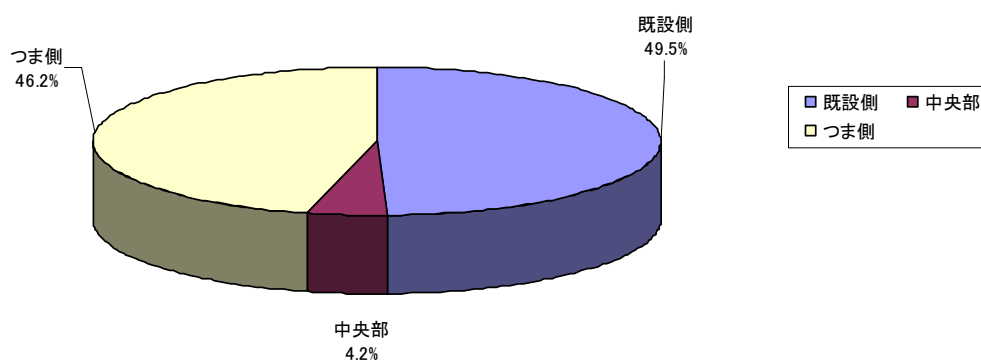


図-3.6 ひび割れ発生位置の割合

3.3 八甲田トンネルにおける施工データの分析

3.2 節における分析の結果、NATM における覆工コンクリートの初期ひび割れは、天端部に発生する縦断方向のひび割れが特徴として挙げられ、ひび割れ抑制への取り組みが重要であることが改めて認識された。ここでは、ひび割れの発生の要因を把握するため、東北新幹線八甲田トンネルにおける施工データ（ひび割れ展開図、配合等）の分析を行った。

3.3.1 分析方法

東北新幹線、八甲田トンネル（築木工区）の打設日報と展開図を照らし合わせ、最も危険視される天端部に発生する縦断ひび割れと水セメント比、単位水量、打設温度、坑内温度、坑内湿度、外気温との相関性をヒストグラムにより検討した。

3.3.2 分析結果

(1) 打設月との相関

図-3.7 に打設月と縦断ひび割れの発生状況を示す。打設スパン数は、2 月～8 月が 20～30 スパン程度、9 月～1 月が 50～60 スパン程度である。このうち、ひび割れの発生していたスパンの割合（ひび割れ発生率）は、7 月が最も少なく 25%程度であり、1 月～3 月、11 月～12 月が 70%程度である。これより、夏期と比較して冬期の方が発生しやすいことが分かる。

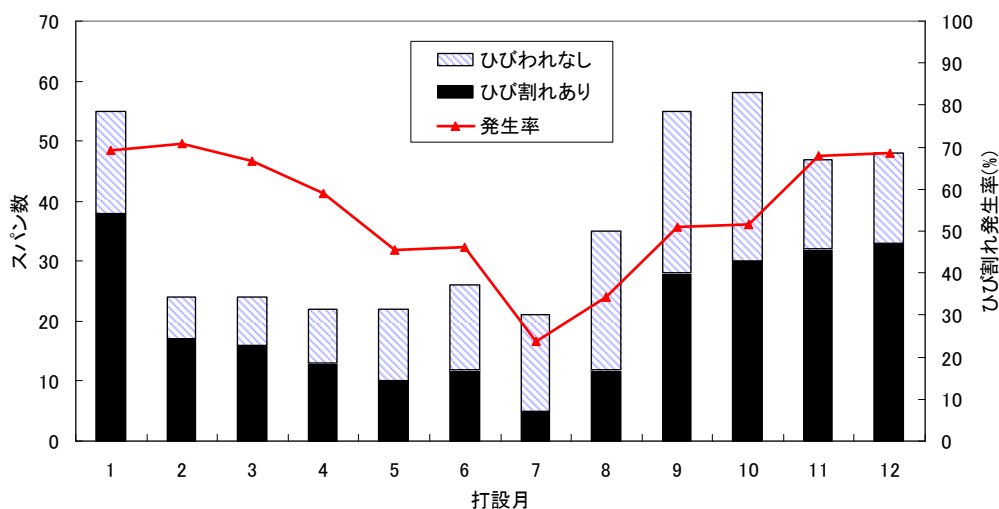


図-3.7 打設月と縦断ひび割れ発生状況

(2) 水セメント比との相関

図-3.8 に水セメント比と縦断ひび割れの発生状況との関係を示す。調査対象スパンで採用されている水セメント比は、図に示すように $W/C=56.9\sim60$ の 6 通りであり $W/C=59\%$ が最も多く採用されていた。ひび割れ発生率をみると、 $W/C=59\%$ と 57% で発生率が 70%程度になっているもののその他では概ね 50%程度となっており、水セメント比とひび割れ発生率について顕著な相関は見られない。

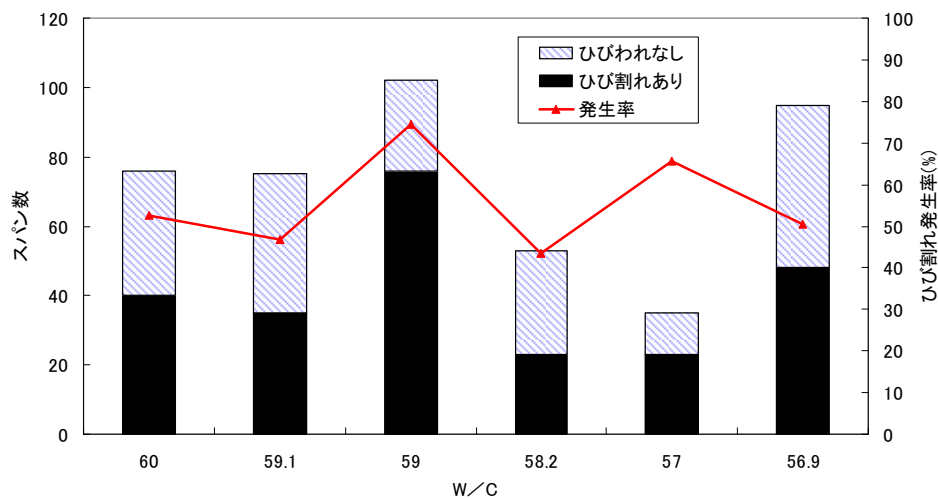


図-3.8 水セメント比と縦断ひび割れ発生状況

(3) 単位水量との相関

図-3.9 に単位水量と縦断ひび割れの発生状況との関係を示す。八甲田トンネルでは、単位水量 $150\text{kg}\leq W<160\text{kg}$ と $160\text{kg}\leq W<170\text{kg}$ が多く採用されている。単位水量 $180\text{kg}\leq W<190\text{kg}$ が 2 スパン採用されているが、ひび割れの発生は確認されていない。ひび割れ発生率をみると、単位水量 $150\text{kg}\leq W<160\text{kg}$ で 25%程度、 $160\text{kg}\leq W<170\text{kg}$ で 35%程度である。このことから単位水量が多くなるとひび割れが発生しやすくなるという一般的な傾向は読みとれる。

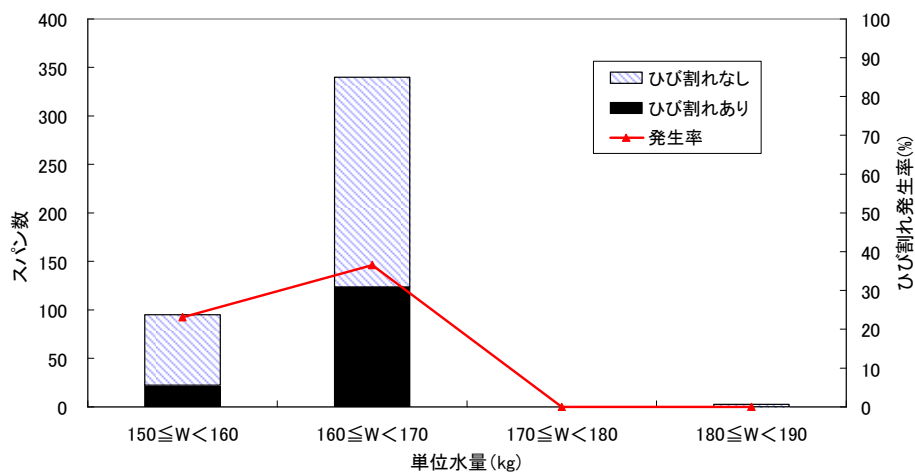


図-3.9 単位水量と縦断ひび割れ発生状況

(4) 打設温度との相関

図-3.10 に打設温度と縦断ひび割れの発生状況との関係を示す。コンクリートの打設温度は、10～30℃の範囲にあるが、14℃が最も多くみられた。ひび割れ発生率は、打設温度20～24℃のとき50%を下回っているものの、18℃以下あるいは26℃以上のとき65～100%を示している。これより、低温域および高温域でのひび割れ発生率が高く、20～24℃でのひび割れ発生率が低いことが分かる。

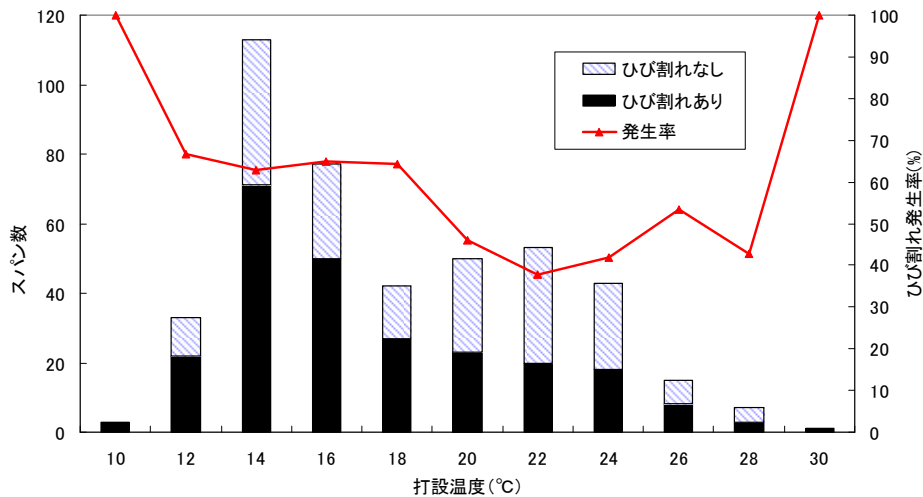


図-3.10 打設温度と縦断ひび割れ発生状況

(5) 坑内温度との相関

図-3.11 に坑内温度と縦断ひび割れの発生状況との関係を示す。打設時の坑内温度は、17.4～21.2℃であり、0.1℃毎に区分してまとめた。ばらつきの多いデータではあるが、19.5℃以下ではひび割れ発生スパン数が多く、19.6℃以上では少ないという傾向のあることが分かる。

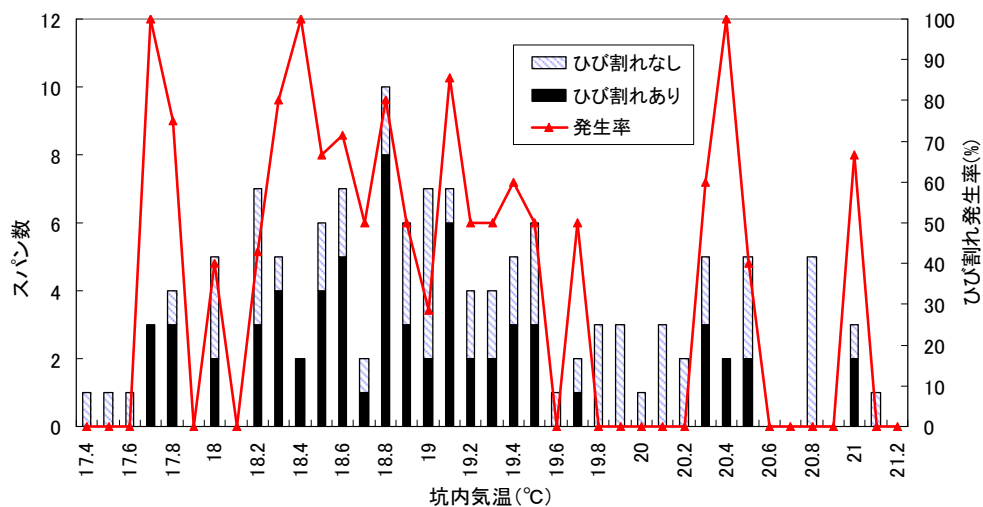


図-3.11 坑内温度と縦断ひび割れ発生状況

(6) 坑内湿度との相関

図-3.12 に坑内湿度と縦断ひび割れの発生状況との関係を示す。これより、坑内湿度が50%～55%の時にひび割れ発生率が最も大きい、全体的な傾向として、湿度が増加するにつれて、ひび割れ発生率が減少していると言える。

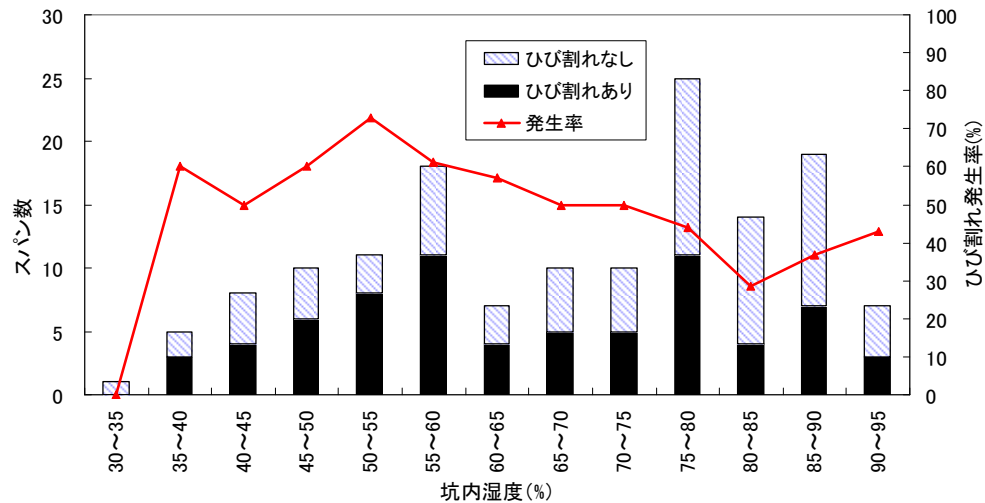


図-3.12 坑内湿度と縦断ひび割れ発生状況

3.4 まとめ

覆工コンクリートに発生している初期ひび割れの実態を把握するため、内空変位、天端沈下等の変位が収束してからコンクリートを打設したスパンを抽出して、施工実態調査を実施した。

(1) 初期ひび割れの特徴

初期ひび割れの発生箇所および形状の実態を把握するため、東北新幹線の岩手・三戸・八甲田の3トンネルを対象としてひび割れ発生の割合、発生箇所、ひび割れ形状の実態を調査した。調査結果は、以下のとおりである。

- ① ひび割れが発生したスパンは2,571スパンのうち967スパンで、全体の40%程度である。
- ② このうち、天端部で発生しているひび割れが半数以上を占めており、その80%以上が縦断ひび割れである。側壁部に関しては、縦断方向と横断方向がほぼ同程度の割合で発生している。
- ③ 縦断ひび割れの60%以上が、一本に伸びたひび割れであり、ひび割れ長さ、発生形態ともに外力によるひび割れの発生状況と類似する。

(2) 坑内環境、コンクリートの品質との関係

天端部の縦断ひび割れに着目し、施工環境やコンクリートの品質とひび割れ発生との因果関係について検討するため、東北新幹線八甲田トンネルのデータを用いて分析を実施した。分析結果は、以下のとおりである。

- ① コンクリートの水セメント比は、ひび割れ発生への顕著な相関は見られない。
- ② ひび割れ発生と打設温度との関係については、18℃以下および26℃以上で発生割合が高い。
- ③ ひび割れ発生と坑内温度との関係については、温度が低い場合（19.5℃以下）で発生割合が高い。
- ④ ひび割れ発生と坑内湿度との関係については、湿度が低く乾燥している状態で発生割合が高い。

以上の分析結果から、覆工コンクリートのひび割れの発生は、坑内湿度、坑内温度および打設温度に関係することが認められた。

参考文献

- 1) (独) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008
- 2) (社) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針, 2000
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル, 1990
- 4) (社) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧, 1993

第4章 覆工コンクリートの初期性状に関する模型試験

4.1 概説

トンネルは橋梁やダム等に比べればコンクリート養生中の温度、湿度のばらつきは小さいものの、坑内換気方式や作業坑からの外気の侵入等の影響によって複雑な変動が見られるため、施工事例のみでひび割れの発生メカニズムを探ることが難しい。

そこで、第3章の分析結果を踏まえて、トンネルの坑内湿度や坑内温度、コンクリート打設温度等の坑内環境、施工条件の違いによる覆工コンクリートの初期挙動の特徴を明らかにするため、覆工コンクリートの模型試験を実施した。

4.2 試験概要

4.2.1 試験体

模型試験には、新幹線トンネルの標準断面に対して内空断面を1/4に縮尺した試験体を使用した。図-4.1に模型試験体概要図、写真-4.1に模型試験装置（外型枠）の全景をそれぞれ示す。

(1) 外型枠

地山を模擬した外型枠には、型枠内面側に吹付けコンクリートを模擬したコンクリートおよび防水シートを施した。このとき、実トンネルにおける吹付けコンクリートの凹凸を模擬するため、図-4.2に示すように、外型枠の内面側に凹凸を設けた。また、型枠外面側には、断熱材（グラスウール）を施して完全断熱状態とすることにより地山を模擬した。脚部底面の内面側は平滑で拘束のない状態とし、外面側には断熱材（ウレタン）を施した。外型枠の設置状況および防水シートの設置状況を、写真-4.2および写真-4.3に示す。

(2) 覆工厚と内型枠

覆工厚は、実トンネルの覆工コンクリートと断面方向に同等のひずみ分布を得るため、実トンネルの標準寸法と同じ30cmとした。内空側の型枠（内型枠）を設置した状況を、写真-4.4に示す。

(3) 試験体の製作（覆工コンクリートの打設、養生、脱型）

覆工コンクリートの打設は、写真-4.5に示すように、養生室内にてコンクリートポンプ車を使用して行った。打設方法は、写真-4.6に示すように、型枠のつま側から打設ホースを挿入し、バイブレータで締固めながら両脚部からの高さが均一となるように打設した。天端部は背面空洞が生じないようにバイブレータで締固めながら打設した。

試験体の養生は、養生室内にエアコンを設置することで、室内の気温・湿度を一定に保ち、打設後は写真-4.7に示すように、試験体外側をシートで覆った。

内型枠の脱型は、各試験ケースにおいて設定した時期に行った。写真-4.8に内型枠の脱型後の状況を示す。

4.2.2 試験方法

コンクリート打設後の硬化、内型枠の脱型、養生の各過程におけるコンクリート内部のひずみ・温度を測定するため、図-4.1に示すようにトンネル周方向の天端部・肩部において、地山側表面、内空側表面からそれぞれ深さ5cmの位置にひずみと温度を同時に測定できるひずみ計（東京測器社製：KM-100AT）を設置した。ひずみ計設置状況を写真-4.9に示す。

なお、養生室内はエアコンを設置することで温度・湿度を一定に保ち、打設後、写真-4.7に示すように養生を行った。

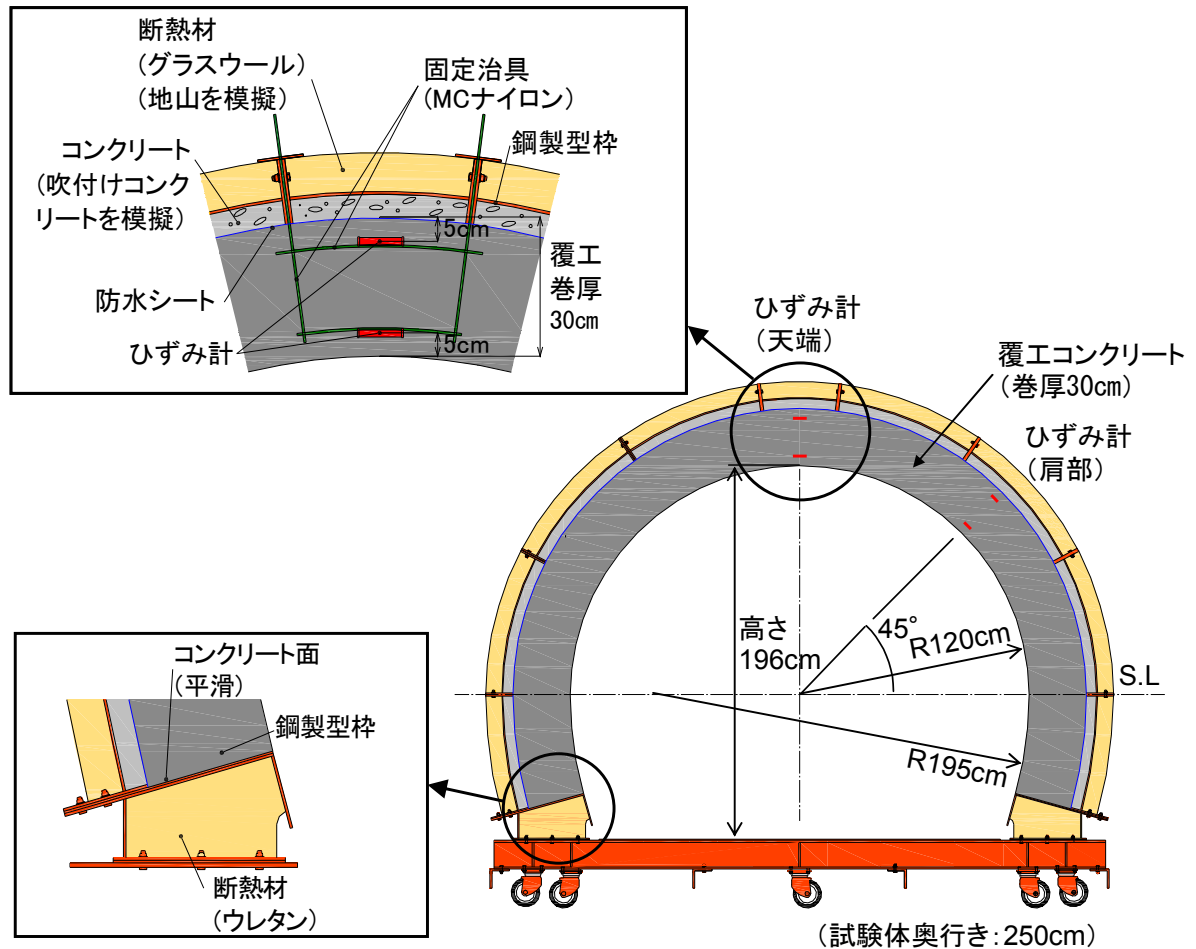


図-4.1 模型試験体概要図

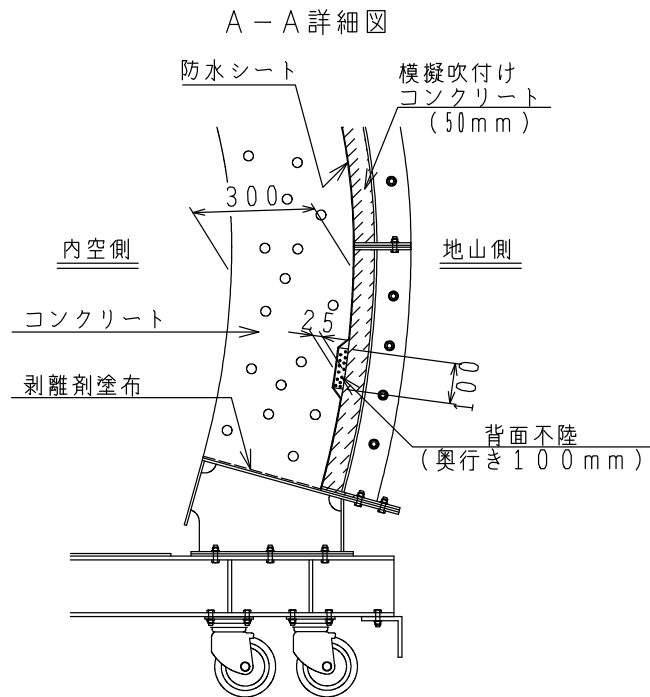


図-4.2 地山の凹凸を模擬した不陸



写真-4.1 模型試験装置全景



写真-4.2 型枠組立状況



写真-4.3 防水シート設置状況



写真-4.4 内型枠設置状況



写真-4.5 コンクリート打設状況



写真-4.6 コンクリート充填状況



写真-4.7 背面養生状況



写真-4.8 脱型状況



写真-4.9 計測器設置状況

4.2.3 試験ケース

第3章の結果によると、坑内湿度が低い場合や坑内温度が低い場合にひび割れが発生しやすい傾向があった。しかし、施工データの分析では、湿度や打設時のコンクリート温度の影響を単独で評価することはできないので、ひび割れ発生に影響を与えられ条件をパラメータとした模型実験を実施することとした。

今回実施した模型試験のコンクリート配合を表-4.1に、試験ケースを表-4.2に示す。

初期ひび割れが発生しやすい条件としては、大別して、乾燥による場合、放熱量が大きい場合の2つがあると予想される。よって、乾燥の影響を評価するために湿度を低下させたケースを、放熱の影響を評価するために打設時のコンクリート温度を上昇させたケースを実施した。また、乾燥、放熱双方に関連が深いと考えられる脱型時間を短くしたケースに関しても実施した。なお、標準ケースは一般的な条件を設定した。

覆工コンクリートの内部ひずみと温度の計測期間は50日間とし、50日間経過後解体し、次のケースへ移った。ただし、標準ケースに関しては、70日間計測を実施した。

表-4.1 コンクリート配合

W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)
		W	C	S	G	
60	49	182	303	873	914	18

W:水
C:セメント
S: 細骨材
G: 粗骨材

表-4.2 試験ケース

Case	坑内 気温 (℃)	坑内 湿度 (%)	坑内 風速 (m/s)	脱型 時間 (時間)	打設時のコ ンクリート 温度 (℃)	防水 シート	備考 (評価内容)
1	20	60	1	18	15	有	標準 ケース
2		50					乾燥の 影響
3		60		12			乾燥・放熱 の影響
4				18	25		放熱の 影響

4.3 試験結果

4.3.1 標準ケース (Case1)

(1) ひび割れの発生状況

図-4.3は、コンクリート打設から70日後における覆工内空面のひび割れ展開図を示したものである。なお、地山側の覆工背面にはひび割れは確認されていない。

天端部から肩部付近にかけて、トンネル軸方向に断片的に伸びるひび割れが発生していることが分かる。また、ひび割れの多くは幅0.02mm以下の極めて微細なものであるが、天端部付近において最大0.06mmの幅のものが数本発生している。なお、図にも併記したように、これらのひび割れ発生位置近傍のコンクリート内部には、ひずみ計が設置されている。

写真-4.10は、試験体解体前（打設後約1年経過後）のひび割れの発生状況を示したものである。この写真から、発生したひび割れは非常に浅く、地山側まで貫通していないことが分かる。

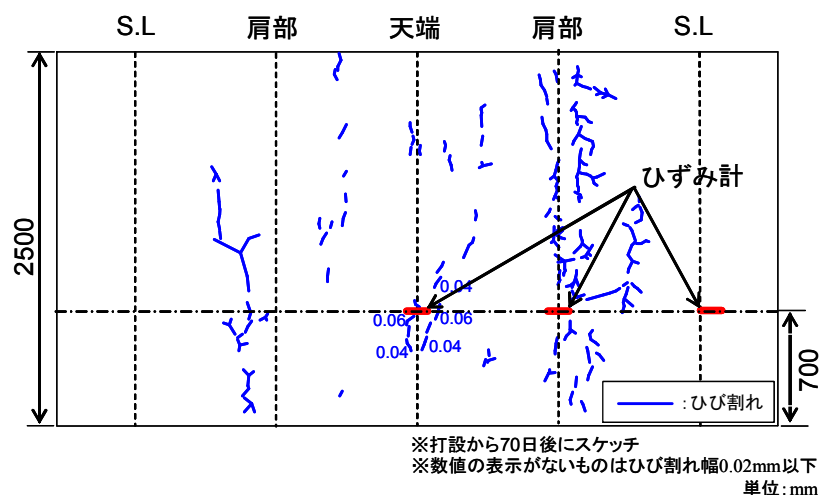


図-4.3 内空面ひび割れ展開図 (標準ケース (Case1))

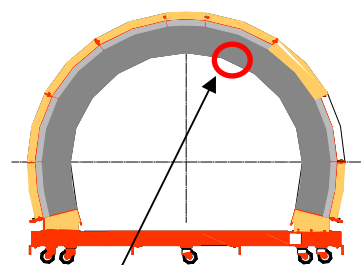


写真-4.10 ひび割れ発生状況 (標準ケース (Case1)、天端～肩部の間)

(2) コンクリート内部ひずみの発生状況

図-4.4、図-4.5は、コンクリート打設から70日後までの天端部、肩部の内空側・地山側のコンクリート温度およびコンクリート内部ひずみの計測結果を示したものである。なお、計測結果は、コンクリートの凝結開始時間である打設完了の8.5時間後（コンクリートの凝結時間試験法（JIS A 1147）による）からのコンクリート温度、ひずみ値である。

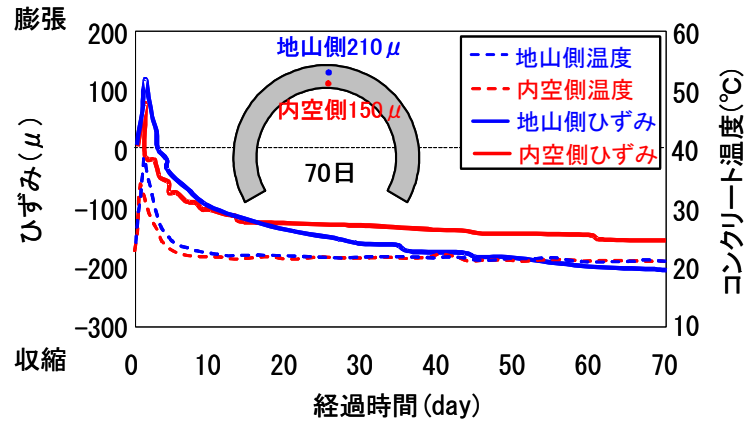


図-4.4 ひずみの経時変化（標準ケース（Case1）、天端部）

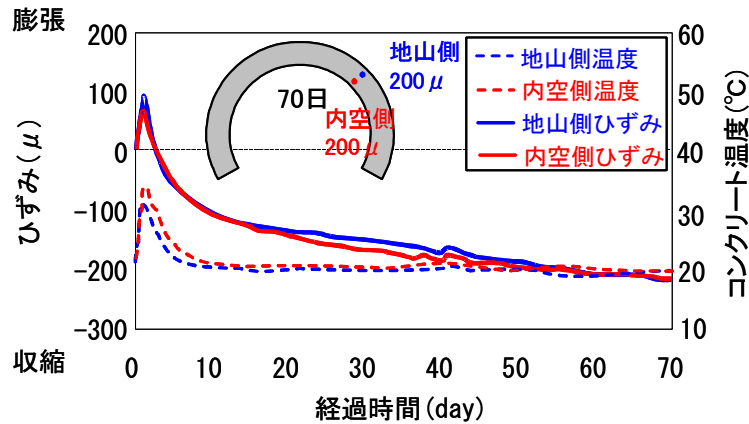


図-4.5 ひずみの経時変化（標準ケース（Case1）、肩部）

図-4.4、図-4.5より、ひずみは、天端部、肩部ともに、初期（コンクリート打込み後1日～2日後）に膨張側に变化し、その後収縮側に变化していることが分かる。

初期の膨張側へのひずみは、天端部の方が肩部よりも大きい。また、天端部（図-4.4）では、地山側の温度が内空側よりも大きく、地山側の方が内空側よりも20 μ 程度大きな膨張ひずみとなっている。この膨張挙動は、セメントの水和反応によってコンクリート内部温度が上昇するために生じる挙動であり、肩部に比べ内部温度の上昇が大きい天端部の特に地山側の膨張ひずみがより大きくなったものと考えられる。

その後の収縮側へのひずみの挙動については、以下のような傾向にあることが分かる。

- ・収縮側へのひずみは、打設後10日程度まで急増した後、増加速度が減少しながら収縮ひずみが徐々に増え続け、打設後70日の時点で150～200 μ 程度となった。
- ・天端部の収縮ひずみ（図-4.4）については、内空側の収縮ひずみが打設後15日頃から非常に緩やかな増加傾向となり、最終的には地山側（200 μ ）より約50 μ 小さいひずみ量（150 μ ）となった。これは、図-4.3に示したように、ひずみ計の近傍に生じたひび割れの影響によるものであると考えられる。
- ・肩部の収縮ひずみ（図-4.5）については、地山側と内空側のひずみはほぼ等しく挙動し、両者とも最終的に200 μ 程度となった。

(3) ひび割れの発生と収縮ひずみとの関係

(1)で示したように、覆工コンクリートの表面付近には、トンネル軸方向に伸びる微細なひび割れが天端部～肩部にかけて発生した。一方、(2)で示したように、覆工コンクリートの内部においては、天端部・肩部、内空側・地山側ともに比較的均一な収縮ひずみが発生していることが確認された。このことは、ひび割れが発生し得る応力状態にあるのは覆工コンクリート表面からごく浅い範囲のみであり、覆工コンクリートの内部および背面付近はひび割れが発生しにくい応力状態にある、ということを示すものであると考えられる。

このメカニズムは、定性的には以下のように説明できるものと考えられる。

① 覆工コンクリート表面付近の応力状態

- ・覆工コンクリート表面付近は、トンネル坑内への放熱と乾燥によって急速に収縮しようとする。これに対して、覆工コンクリート内部は収縮の度合いが表層より緩やかである。そのため、覆工コンクリートの表層付近と内部との間には、収縮ひずみの差が生じる。
- ・この場合、表面付近の収縮挙動は覆工コンクリート内部から拘束（内部拘束）を受けることになるので、表面付近には引張応力が発生する。
- ・この引張応力が引張強度を超えると、表面付近に収縮に伴うひび割れが発生する。

② 覆工コンクリート内部の応力状態

- ・覆工コンクリート内部の収縮ひずみ分布が均一であれば、内部拘束が生じないので、覆工コンクリート内部に大きな応力は発生しない。そのため、表面付近のひび割れが内部に及ぶことはない。

③ 背面側の応力状態

- ・背面側は、防水シートによって吹付けコンクリートの凹凸に起因する拘束（外部拘束）を低減しているため、比較的自由に収縮できる状況にある。そのため、背面側に大きな応力が発生することはない、ひび割れが生じることはない。

4.3.2 その他のケース (Case2～Case4)

坑内環境・施工条件を変えたCase2～Case4のひずみの変化について、天端部のコンクリート内部のひずみ分布に着目して示す。

(1) 坑内湿度を60%から50%に低下させたケース (Case2)

図-4.7に、坑内湿度を50%に低下させたケース (Case2) の天端部の内空側と地山側のコンクリート温度およびひずみの経時変化を示す。

経時により内空側と地山側のひずみ差が漸増し、コンクリート打込み50日後では内空側の収縮ひずみが 260μ で地山側より 80μ 程度大きいひずみ値を示した。このことは、標準ケースの場合に比べて、内空側にひび割れが発生しやすい。

(2) 脱型時間を標準の18時間後から12時間後と短くしたケース (Case3)

図-4.8に、脱型時間を標準の18時間後から12時間後と短くしたケース (Case3) のコンクリート温度およびひずみの経時変化を示す。

標準ケースと比較すると、初期の膨張ひずみが非常に小さいことが分かる。これは、早期脱型によって水和熱の放熱が促進されるためであると考えられる。

その後は、急激に収縮ひずみが大きくなり、コンクリート打込み50日後では内空側の収縮ひずみが 250μ 、地山側が 260μ という大きな収縮ひずみが発生している。ただし、厚さ方向のひずみの差は非常に小さいので、覆工コンクリート内部にひび割れが発生しにくい。

(3) 打設時のコンクリート温度を 15°C から 25°C に上昇させたケース (Case4)

図-4.9に打設時のコンクリート温度を上昇させたケース (Case4) のコンクリート温度およびひずみの経時変化を示す。

脱型後、初期の段階から内空側の収縮ひずみが急激に増加し、コンクリート打込み5日後には、内空側で 120μ 、地山側で 50μ となり、 70μ の差が発生し、ひび割れが内空側に発生しやすくなる。しかし、その後は経時とともにひずみの差は小さくなっている。

以上の(1)～(3)より、坑内湿度、脱型時間、打設時のコンクリート温度を各々変化させた場合、天端部のコンクリート内部における収縮ひずみの発生状況から推定されるひび割れ発生への影響は、以下のようになる。

- ・坑内湿度を低下させると、内空側の収縮ひずみが地山側より大きくなるので、内部拘束により内空側にひび割れが発生しやすくなる。すなわち、坑内湿度は、ひび割れの発生に大きな影響を及ぼす要因である。
- ・脱型時間については、内空側と地山側の収縮ひずみ差が殆ど生じないことから、ひび割れ発生への影響は比較的小さい要因である。
- ・打設時のコンクリート温度を上昇させると、内空側の収縮ひずみが地山側より大きくなるので、内部拘束により内空側にひび割れが発生しやすくなる。すなわち、坑内湿度の場合と同様に、打設時のコンクリート温度は、ひび割れの発生に大きな影響を及ぼす要因である。

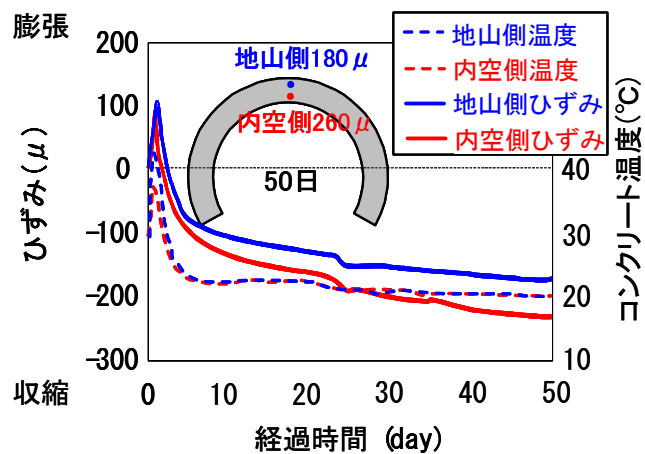


図-4.7 ひずみの経時変化（湿度低下（Case2）、天端）

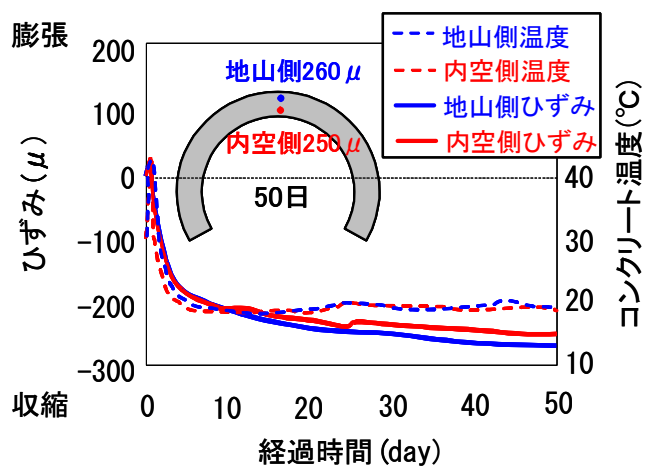


図-4.8 ひずみの経時変化（脱型時間短縮（Case3）、天端）

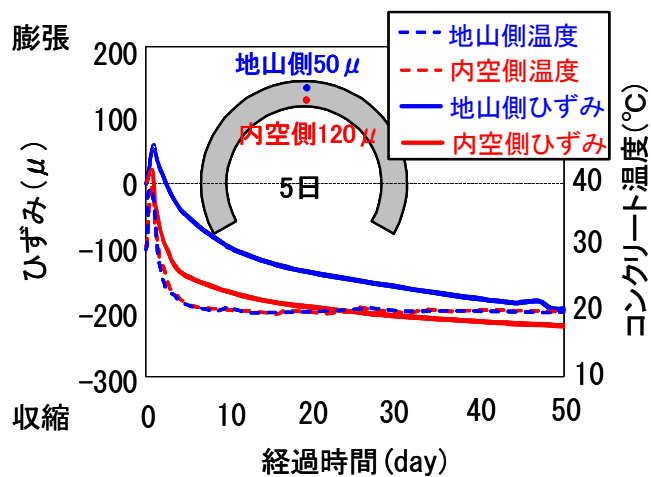


図-4.9 ひずみの経時変化（打設温度上昇（Case4）、天端）

4.4 まとめ

山岳トンネルの坑内環境と覆工コンクリートの施工を模擬した模型試験を行い、厚さ方向のひずみ分布に着目してひび割れの入りやすさを定性的に把握した。

模型試験により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 標準ケース（坑内気温20度、坑内湿度60%、坑内風速1m/s、脱型時間18時間、打設時のコンクリート温度15度）の結果から、以下の知見が得られた。

- ① 覆工コンクリート表面の天端部～肩部に、トンネル軸方向に伸びるひび割れが発生するが、これらは最大でも0.06mmであり、表面付近に生じるのみである。
- ② 覆工コンクリートの内部においては、天端部・肩部、内空側・地山側ともに比較的均一に収縮ひずみが生じる。
- ③ 以上より、ひび割れが発生し得る応力状態にあるのは覆工コンクリート表面からごく浅い範囲のみであり、覆工コンクリートの内部はひび割れが発生しにくい応力状態にあるものと考えられる。

(2) 坑内湿度、脱型時間、打設時のコンクリート温度を各々変化させた場合、天端部のコンクリート内部における収縮ひずみの状況から推定されるひび割れ発生への影響は、以下のとおりである。

- ① 坑内湿度を低下させた場合、内空側の乾燥収縮により、内空側の収縮ひずみが地山側に比べて大きくなり、標準ケースと比べて覆工コンクリート表面にひび割れが発生しやすくなる。
- ② 型枠脱型時間を短縮した場合、初期の膨張ひずみは小さく、その後急激に収縮ひずみが増大し標準ケースよりも大きな収縮ひずみとなるが、厚さ方向のひずみ分布は均一なので、ひび割れが発生しにくくなる。
- ③ 打設時のコンクリート温度を上昇させた場合、初期の段階で内空側の収縮ひずみが急激に増大するので、この時点で覆工コンクリート表面にひび割れが発生しやすくなる。

以上のように、本章では、実際の施工・坑内環境を模擬した覆工コンクリートの模型試験を実施し、厚さ方向のひずみ分布に着目して、覆工コンクリートへのひび割れの入りやすさを把握することができた。限られた実験ケースしか行うことができなかったため定量的な評価ができないが、更に実態を解明するために現地計測を行うとともに、数値解析によりシミュレーションを行い、上記の結果を検証することとする。

第5章 覆工コンクリートの初期性状に関する現地計測

5.1 概説

第3章で行った施工実態調査の結果、約40%のスパンにひび割れが発生することが分かった。このうち、天端部の縦断方向に発生するものが多く見られ、坑内温度や坑内湿度等の坑内環境の違いによってひび割れ発生の状況に差異があることが分かった。

一般にトンネル施工時の坑内環境については、温度が安定し、湿潤状態にあると言われている。しかし近年では作業環境の改善を目的として換気設備が大型化し、トンネル施工中の坑内環境条件が坑外の季節変動に影響されている可能性がある。これは、第3章での結果と整合しており、坑内環境とひび割れ発生の関連性を捉えることは、初期ひび割れの抑制対策を考察する上で重要であると考ええる。

これまで坑内環境条件に着目した要素実験を行った研究¹⁾はあるものの、現地の坑内環境とひび割れ状況を同時に計測した例はみられない。以上の状況を踏まえ、東北新幹線八甲田トンネルの覆工コンクリート打設現場において現地計測を実施した。現地計測は、坑内の環境条件の差を明確にするため、坑内が高温・多湿となる夏期と低温・乾燥となる冬期の2ケースについて実施した。具体的には、表5.1に示すように、平成17年8月に打設した覆工コンクリート（以下、この覆工コンクリートを「夏期施工」と呼ぶ）に生じるひび割れの性状と、平成18年2月に打設した覆工コンクリート（以下、この覆工コンクリートを「冬期施工」と呼ぶ）に生じるひび割れの性状を比較するため、打設時期の異なる2箇所において計測を行った。また、覆工コンクリートに発生したひび割れの観察を近接目視により行い、ひび割れの発生形態と計測値との相関性について分析し、ひび割れ発生原因について検討した。

表-5.1 計測ケース

ケース	打設時期	打設温度	脱型時間	計測開始時期
①	夏	高い	標準（15時間）	平成17年8月
②	冬	低い	標準（15時間）	平成18年2月

5.2 初期ひび割れに関する現地計測（夏期・冬期）

5.2.1 計測条件

(1) 計測スパン

計測は坑内環境の変化が覆工コンクリートに及ぼす影響を把握する目的で実施した。そのため、計測箇所は覆工コンクリートに土圧等の外力が作用せず内空変位が完全に収束している箇所を選定した。選定した箇所は鋼製支保工が建て込まれていない、吹付けコンクリートのみの箇所とした。該当する箇所は、東北新幹線八甲田トンネル築木工区内、キロ程 652km140m 付近、および 653km140m 付近である。

図-5.1 に八甲田トンネルにおける計測実施箇所を示し、図-5.2 に支保パターン図を示す。なお、夏期施工・冬期施工の断面形状の違いは、直線区間（夏期）・曲線区間（冬期）によるもので計測結果への影響はない。

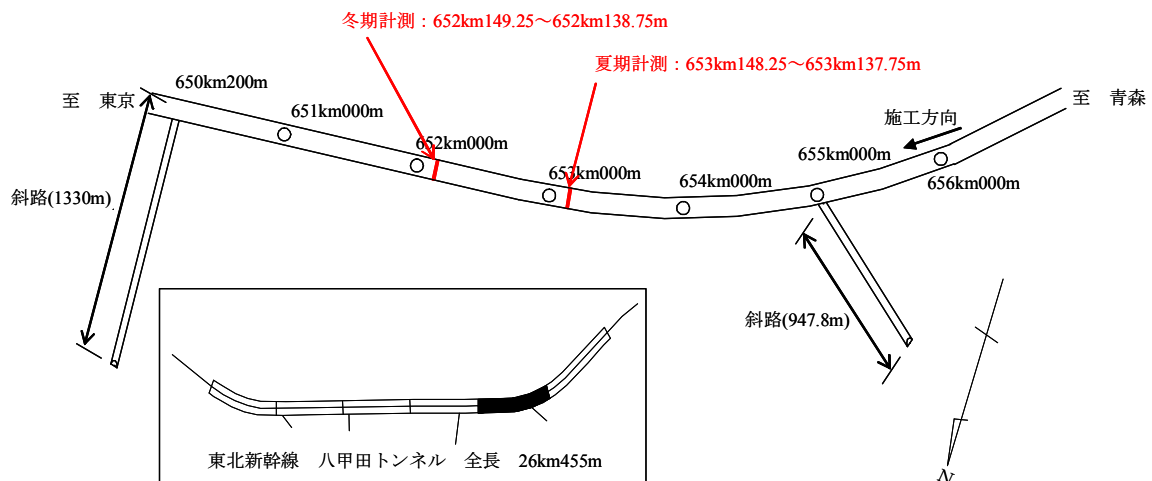
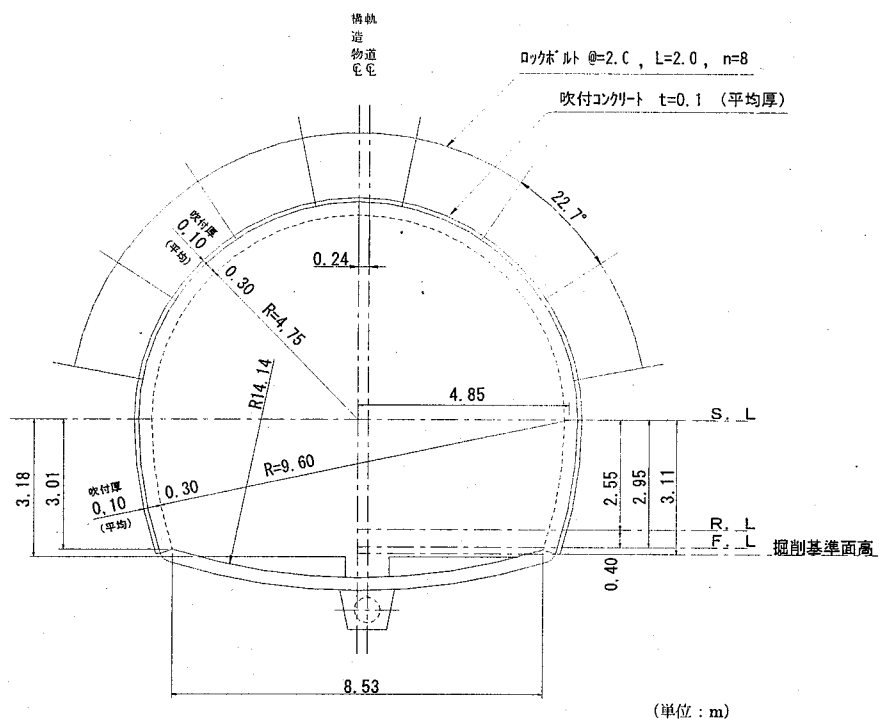
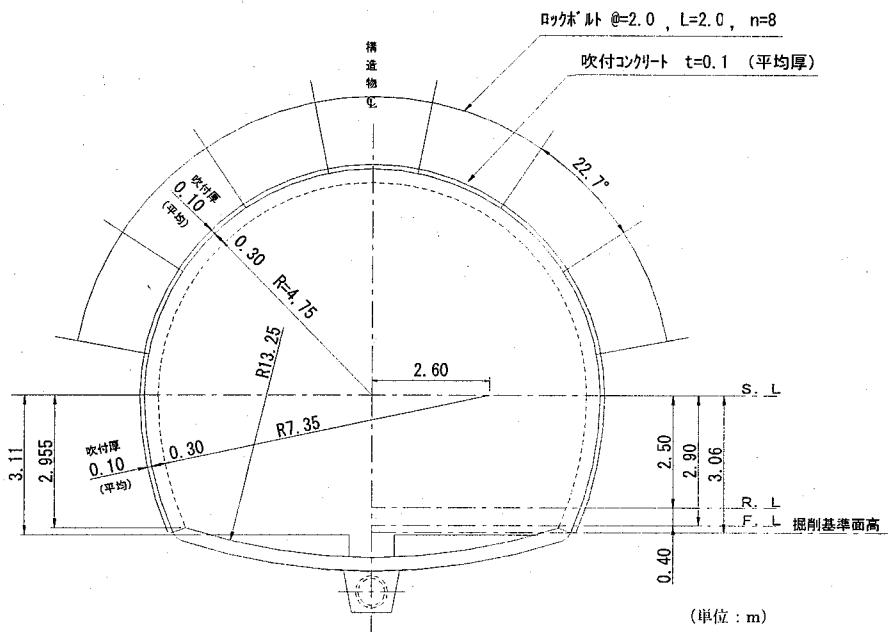


図-5.1 東北新幹線八甲田トンネルにおける計測位置



a) 夏期施工



b) 冬期施工

図-5.2 計測箇所における支保パターン図

(2) 計測項目

覆工コンクリートの硬化過程における内部ひずみと内部温度を測定し、ひずみと温度の関係を調べるため、覆工コンクリート内部の天端部、肩部、SL 部の内空側および地山側に温度測定機能付きのひずみ計を設置した。また、打設後、覆工コンクリート表面にひび割れが生じる時期を把握するため、脱型後の覆工コンクリート表面にひずみゲージを設置した。覆工コンクリート内部の温度は温度測定機能付きのひずみ計で測定できるが、補足的に熱電対を覆工コンクリート内部に設置し、覆工コンクリート内部の温度を測定した。また、坑内環境を把握するため、天端部、SL 部には温度・湿度計を設置した。表-5.1 に計測機器一覧表、図-5.3 に計測器の配置図、写真-5.1 に内面ひずみゲージの設置状況を示す。

覆工コンクリート内部に埋設した計器類は、打設時から計測を行い、覆工コンクリート表面のひずみゲージおよび温度・湿度計は打設 3 日後までに設置を完了した。なお、埋設した計器類の固定は、固定金具の剛性がひずみ計の計測結果に影響が出ないように、覆工コンクリートと線膨張係数等が類似する MC ナイロン製のものを使用した。

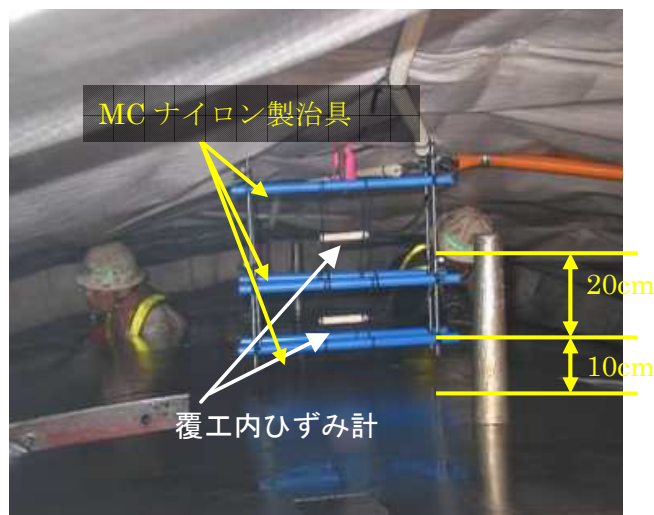


写真-5.1 内面ひずみゲージの設置状況

表-5.1 計測機器一覧

対象物	No.	項目	目的	部位			点数				機器仕様			備考
				箇所	断面	方向	断面あたり	ケースあたり 断面数	ケースあたり	合計 (2ケース)	機器	形式	メーカー	
覆工 コンクリート	①	内部 ひずみ	覆工コンクリートの硬化過程(発熱, 温度低下)の内部ひずみと内部温度を計測することで, ひずみと温度の関係を把握する。 また, 覆工コンクリートに発生するひずみのうち, ダミーコンクリート計測によって得られる温度ひずみとの差(温度以外の要因によるひずみ)を把握し, 外部拘束(荷重作用の影響を含む)の影響程度を把握する。	天端部 肩部 (45°) SL部 の内外周	A-A	円周	6	1	6	12	測温機能 付き ひずみ計	KM-100AT	東京測器 研究所	
	②	内部 温度	さらに, 打設時期(打設温度), 養生条件等の試験条件の相違によるコンクリートひずみの発生状況を比較する。 覆工コンクリートの温度応力解析に資するデータとする。		A-A	—	6	1	6	12				
	③	内面 ひび割れ	内面に発生すると予想されるひび割れとその発生時期を検知し, ひび割れ発生の諸条件(材齢, 周辺環境, コンクリート温度など)を把握する。	天端部の内面	A-A	円周	11	1	11	22	ひずみ ゲージ	PL-120-11	東京測器 研究所	
	④				B-B		11	2	22	44	ハイクエージ	PI-5-100		
	⑤				—		—	—	—	5				
	⑥	内部温度 (ひび割れ)	内面ひび割れを検知する部位の近傍のコンクリート温度を測定することで, ひび割れ発生のコンクリートの温度条件を把握する(A-Aについては上記の内部温度計測の結果を代用する)。	天端部の内部	—	1	2	2	4	熱電対	T			
坑内 環境	⑦	温度	覆工コンクリート打設時, 養生時の坑内の温度湿度を計測し, 各打設ブロック毎の打設環境, 養生環境に関する相違を把握する。また, 試験ケース毎の環境条件の相違も把握する。 覆工コンクリートの温度応力解析に資するデータとする。	天端部 SL部 の坑内	A-A	—	2	1	2	4	温度湿度 計	HD9809T-80	T&F	
	⑧	湿度			B-B									
その他	⑨	データ 収録	計測されるデータを回収, 保存し, 温度応力解析に資する電子データとする。	SL部 近傍の坑内	A-A	—	—	—	1	2	データロガー	TDS-102-20	東京測器 研究所	20ch/台
									2	4	スイッチ ボックス	FSW-21C		20ch/台

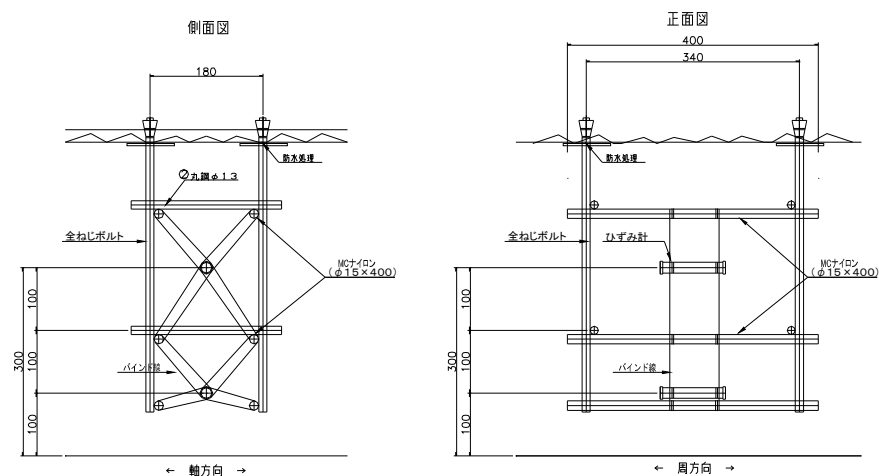
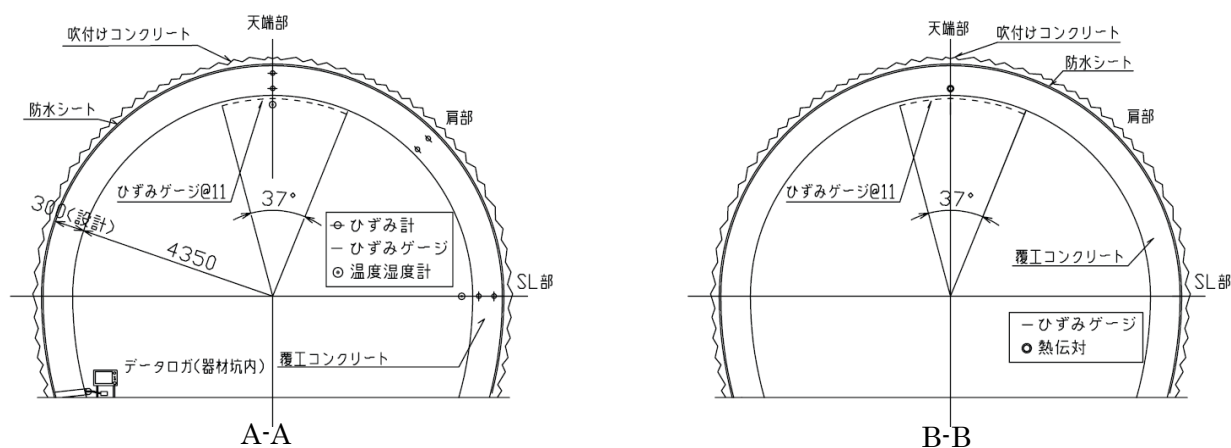
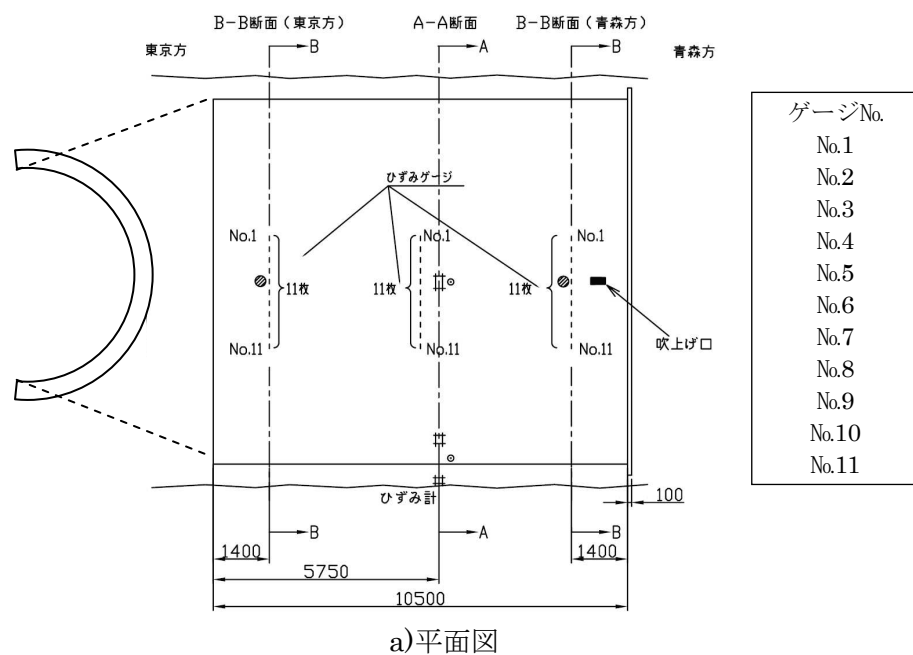


図-5.3 計測器配置図

(3) 施工条件、施工工程

表-5.2 に施工条件を示す。コンクリートは同一の配合条件とした。背面シートは、夏期が防水機能を持たないアイソレーションシートで冬期は、防水シートを用いている。シートの機能に若干の差異はあるものの、両者とも覆工コンクリートと支保工との境界部に縁切りとして設置しており、計測結果への影響はないものと判断される。図-5.4 にコンクリートの施工工程を示す。現場の施工上の制約があるものの、コンクリートの打設・脱型条件をできる限り同一にした。脱型時間は打設完了 15 時間後とした。また、図-5.5 にコンクリートの強度試験結果を示す。圧縮強度は、夏期・冬期とも 28 日強度は 27.3 N/mm^2 と同一であるが、脱型時は夏期施工は 2.29 N/mm^2 であるのに対し、冬期施工は 1.85 N/mm^2 と 20%程度低くなっている。

表-5.2 施工条件

	夏期施工	冬期施工
覆工コンクリート 打設月	8月	2月
脱型時間	打設完了15時間後	
背面シート	アイソレーションシート	防水シート
コンクリート配合	C=278kg/m ³ 、W=162kg/m ³ 、 W/C=58.2%(示方配合)	
打設温度	29℃	16℃
練混ぜ水	常温水	温水

※ アイソレーションシート：防水機能を持たないシート

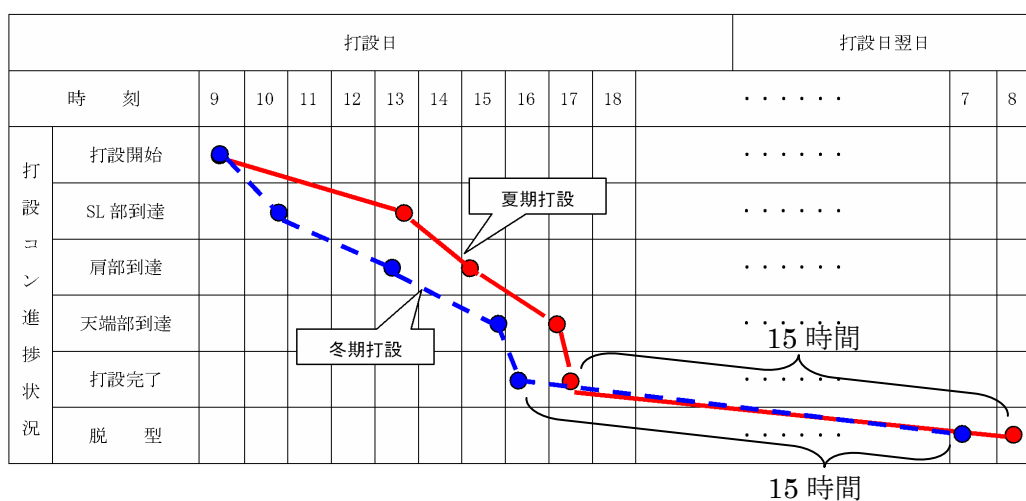
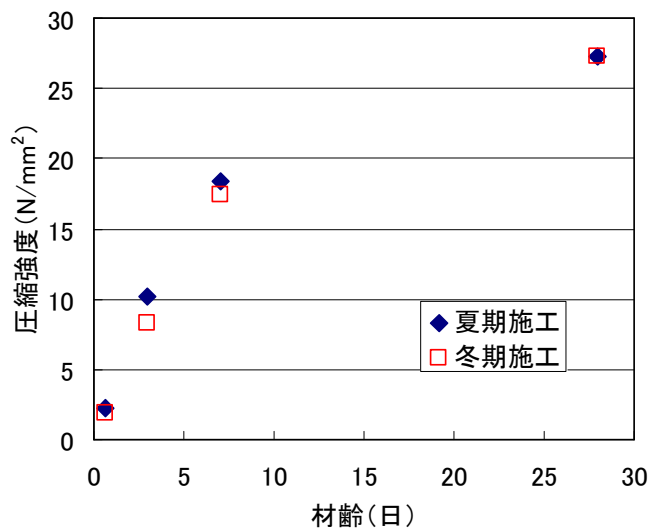


図-5.4 施工工程



	圧縮強度(N/mm²)	
	夏期施工	冬期施工
15時間	2.29	1.85
3日	10.2	8.34
7日	18.4	17.4
28日	27.3	27.3

図-5.5 強度試験結果

5.2.2 計測結果

(1) 坑内温度・湿度

坑内温度・湿度とひび割れの発生状況の関係を調べるため、坑内温度・湿度の計測を脱型直後から実施した。図-5.6、図-5.7 に夏期施工、冬期施工における天端部と SL 部の坑内温度・湿度を示す。なお、計測開始時にはトンネルは既に貫通していた。

図-5.6、図-5.7 より温度・湿度の経時的な傾向をみると、夏期施工、冬期施工ともに天端部、SL 部において季節的な変動がみられ、年間を通して周期的に変動している。

坑内湿度については、平成 18 年 8 月頃に 100%に達し、表面の結露も確認された。平成 18 年 8 月頃以降は次第に低下し、平成 19 年 2 月～3 月頃に 40%程度まで低下している。短期間で湿度の推移を見ると、平成 17 年 11 月頃から平成 18 年 5 月頃にかけて変動幅が大きくなっているが、工区毎に坑内の温度・湿度を保つため、外気を遮断する扉（以下、遮断扉と記す）を設置しており、その後は湿度の短期的な変動は小さくなっている。

一方、坑内温度の傾向をみると、季節的な変動は坑内湿度と同じく見られるものの短期的な変動は小さく、12～18℃程度で推移し、年最高気温と最低気温の差は 6℃程度である。

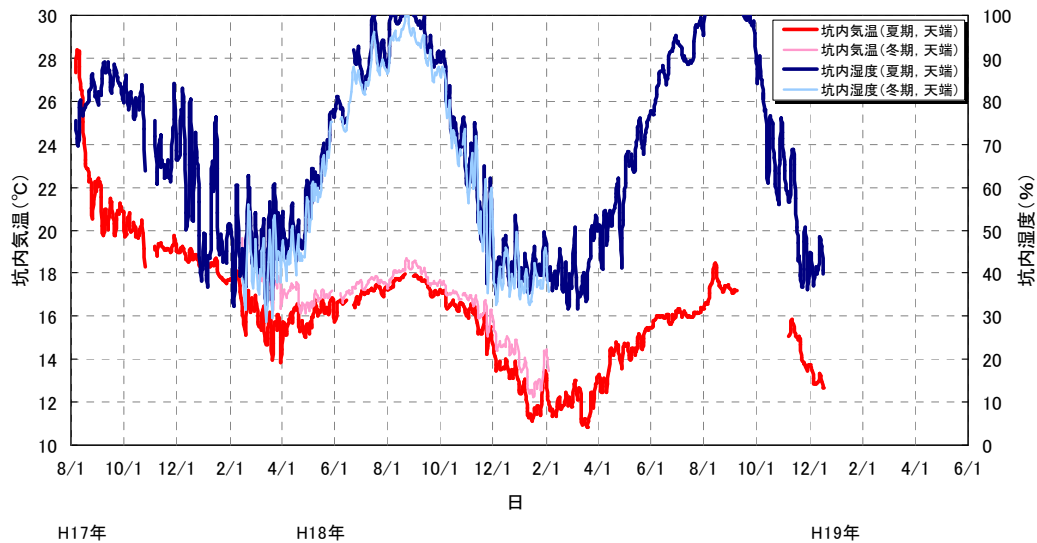


図-5.6 坑内温度と湿度の関係（天端部）

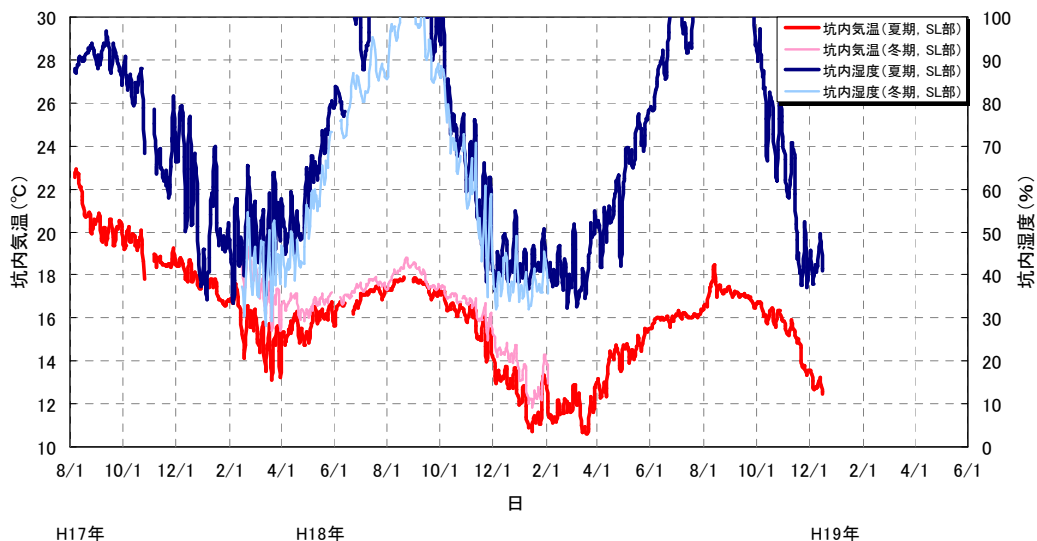


図-5.7 坑内温度と湿度の関係（SL部）

(2) 内部ひずみ

覆工コンクリートの挙動に坑内環境の変動が及ぼす影響を調べることを目的に、初期材齢時および長期における計測データの整理・分析を行う。

図-5.8 に初期材齢時における内部ひずみおよび内部温度の経時変化図を示す。内部ひずみはコンクリートの凝結開始時間である打設完了の 8.5 時間後（コンクリートの凝結時間試験法（JIS A 1147）による）を基準とし、脱型は夏期施工、冬期施工ともに打設完了の 15 時間後に実施した。

初期材齢時の内部ひずみの推移をみると夏期施工、冬期施工ともにコンクリートの水和反応による発熱に伴い、内部ひずみは膨張側に変動する。夏期施工は、内部ひずみ（膨張）および温度がいずれも脱型した時点がピークで、脱型後は、温度降下に伴い内部ひずみが収縮側に推移する。これに対し、冬期施工では脱型後も内部ひずみ、温度ともに

増加傾向にあることが分かる。また、冬期施工では脱型時に内部ひずみが急激に収縮側に推移するが、水和反応による温度上昇に伴い内部ひずみも膨張側に推移する。打設後72時間経過した時点の内部温度は、夏期施工、冬期施工ともに40℃程度となっている。図-5.5に示したように冬期施工が夏期施工に比べ脱型時のコンクリートの強度発現が遅くなっているが、これは冬期施工の温度上昇の遅れによるためと考えられる。

図-5.9に覆工コンクリートの天端部と肩部の夏期施工、冬期施工の内部ひずみ、コンクリート内部温度、坑内温度の長期の経時変化を示す。

コンクリート内部温度は夏期施工ではコンクリート打設6ヶ月後、冬期施工ではコンクリート打設1ヶ月後以降に坑内温度とほぼ同じ値となり、内部ひずみは坑内温度と同様な傾向で周期的な増減をしながら収縮ひずみが増加する。しかし、その値は初期に比べて小さいものとなっている。

夏期施工の天端部の内部ひずみは、内空側の収縮ひずみが地山側より大きく、初期段階ではひずみ差が大きいが時間経過に伴い、その差は小さくなっていく傾向にある。今回測定期間の中での最大ひずみ値は平成20年1月の湿度40%と低い期間で、地山側約460 μ 、内空側で約510 μ の収縮ひずみである。肩部についても初期におけるひずみ差は大きい、時間経過に伴い小さくなっている。収縮ひずみ値は内空側で約440 μ が最大で、地山側が約450 μ でその差は天端部に比べて小さくなっている。次に、冬期施工の天端部の内部ひずみについては内空側が大きいとその差は小さい。地山側と内空側の最大収縮ひずみは約320 μ 程度である。それと比して、肩部の最大収縮ひずみは、内空側が約410 μ 、地山側が約310 μ である。

内部ひずみの推移を夏期施工と冬期施工の天端部で比較すると、打設時の膨張側へのひずみは、夏期施工で20 μ 、冬期施工で110 μ 程度と90 μ の差となり大きい。収縮側のひずみ値は、天端部での最終計測値では夏期施工の方が冬期施工に比べ約150～200 μ 大きい値と示した。なお、肩部でも定性的には同様の傾向を示している。

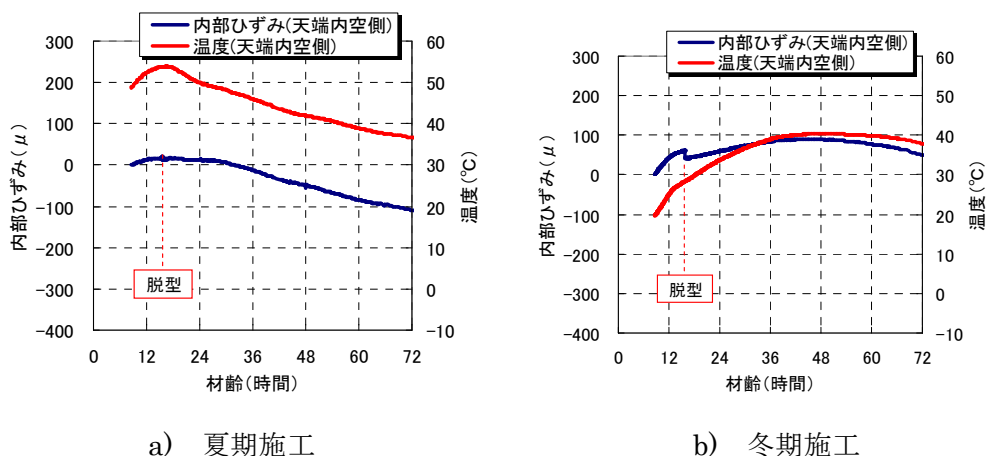
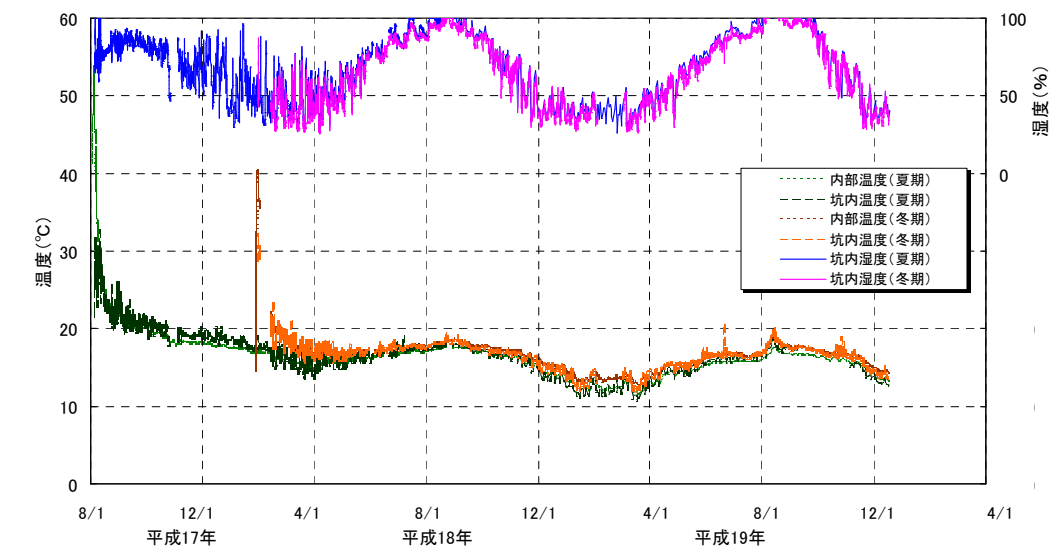
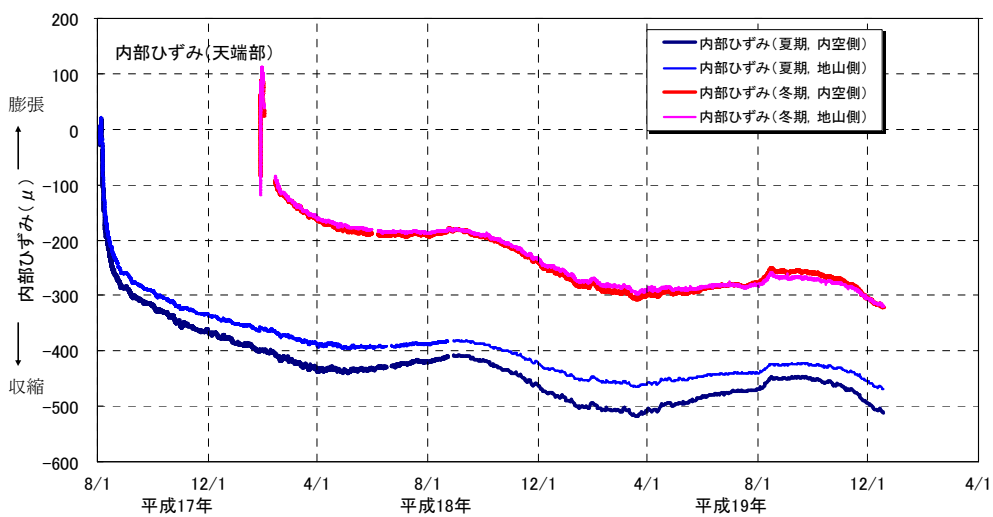


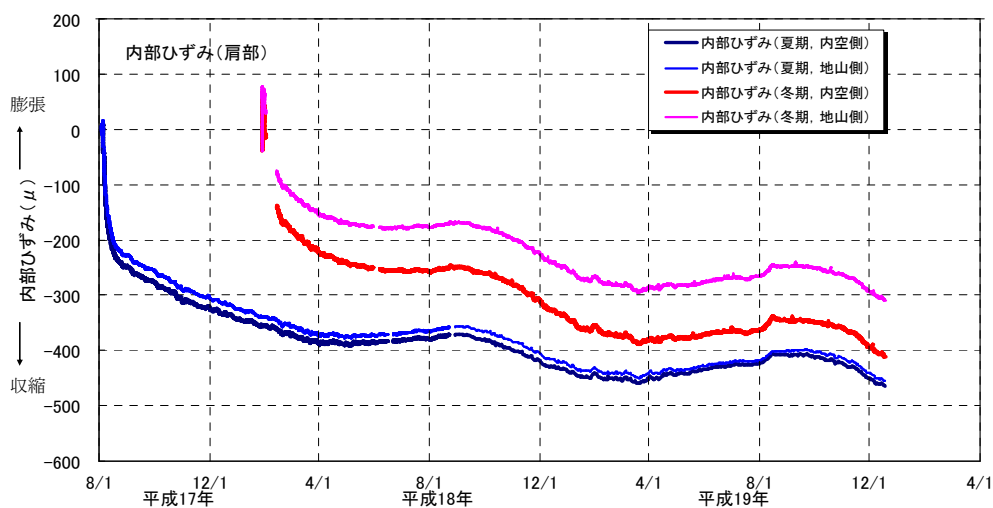
図-5.8 初期材齢における内部ひずみの比較



a) 坑内温度および坑内湿度



b) 内部ひずみ（天端部）



c) 内部ひずみ（肩部）

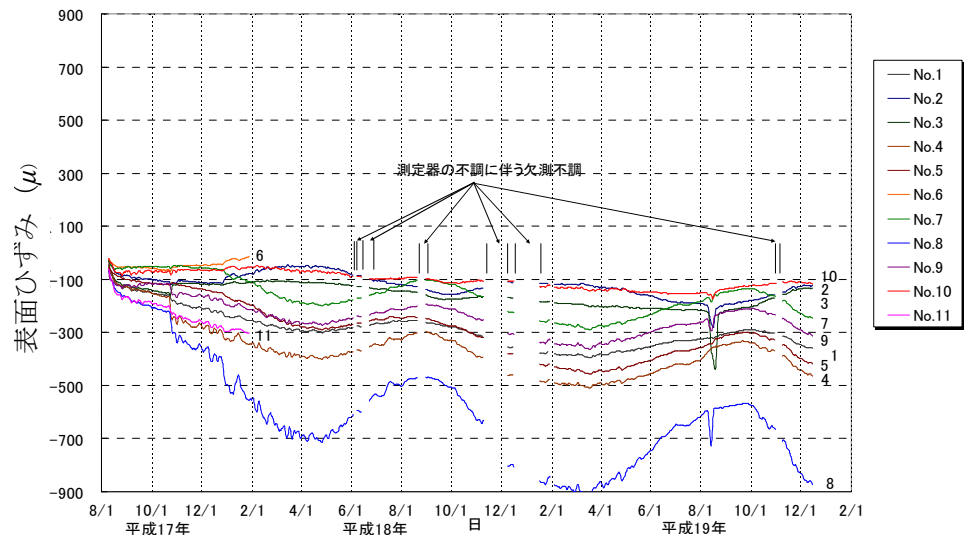
図-5.9 内部ひずみ計の長期経時変化

(3) 表面ひずみ

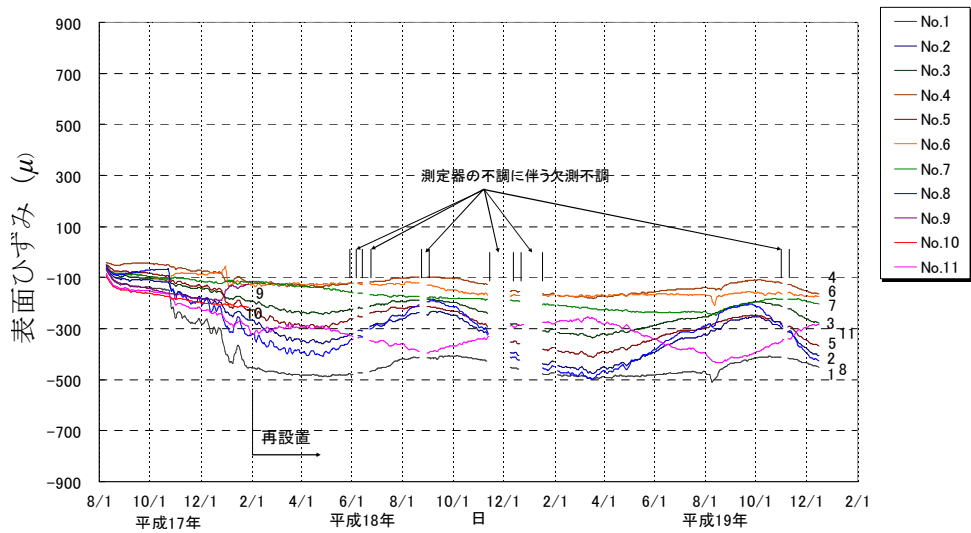
覆工コンクリートの表面ひずみの変動による影響を調べることを目的とし、計測データの整理・分析を行う。

図-5.10 に夏期施工、図-5.11 に冬期施工の表面ひずみの経時変化を示す。計測値は、比較的安定して推移する内部ひずみに比べ、日変動が激しいことから、覆工コンクリート表面が坑内環境の影響を受けやすいことを示している。また、長期的にも夏期施工、冬期施工ともに季節的な影響と思われる変動がみられ、表面ひずみは小規模ものが発生している。3.2 節では、既設側とつま側の天端部にひび割れが多くみられる傾向を示したが、覆工コンクリートの中央部、既設側、つま側の違いによるひずみの大きさの違いについては、明確には確認できない。

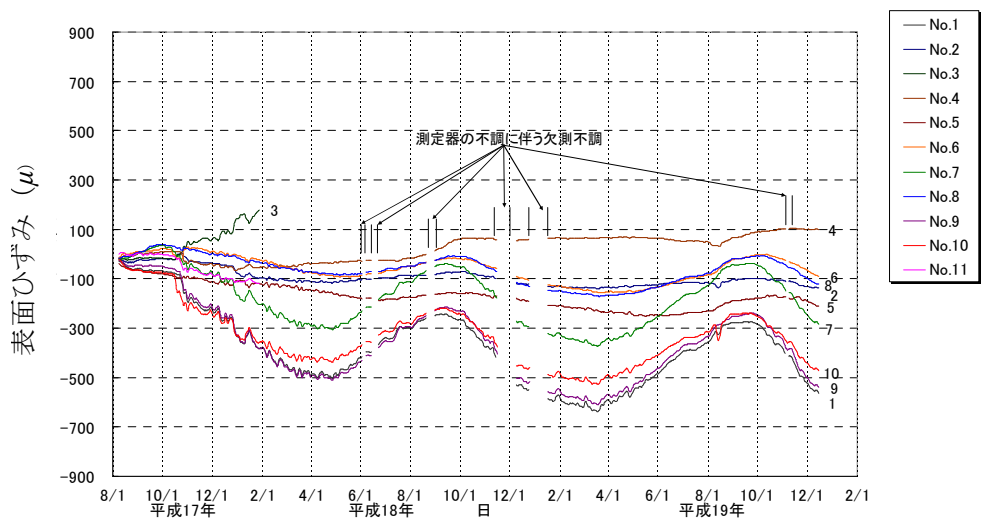
夏期施工および冬期施工の表面ひずみの傾向を比較すると、夏期施工では打設後3ヶ月経過時に表面ひずみの変動が大きくなっている。大半は縮み側に推移しているが、一部伸び側に推移したものもある。図-5.9 a) から打設後3ヶ月経過時(平成17年11月)には、坑内湿度が一時、急激に低下している時期と重なっている。一方、冬期施工は打設直後から伸び側、縮み側それぞれに推移する部位が明確に分かれ、ひずみ量は夏期施工より大きい。



a) つま側

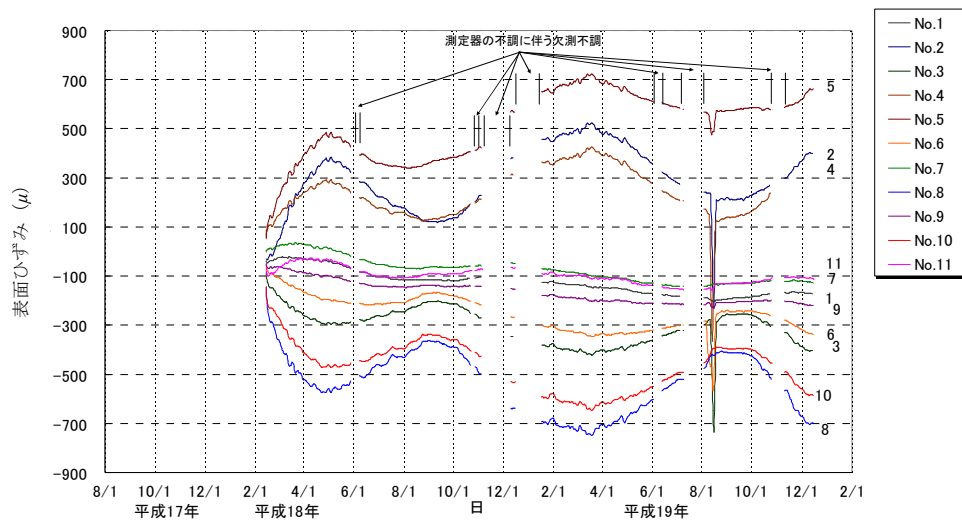


b) 中央部

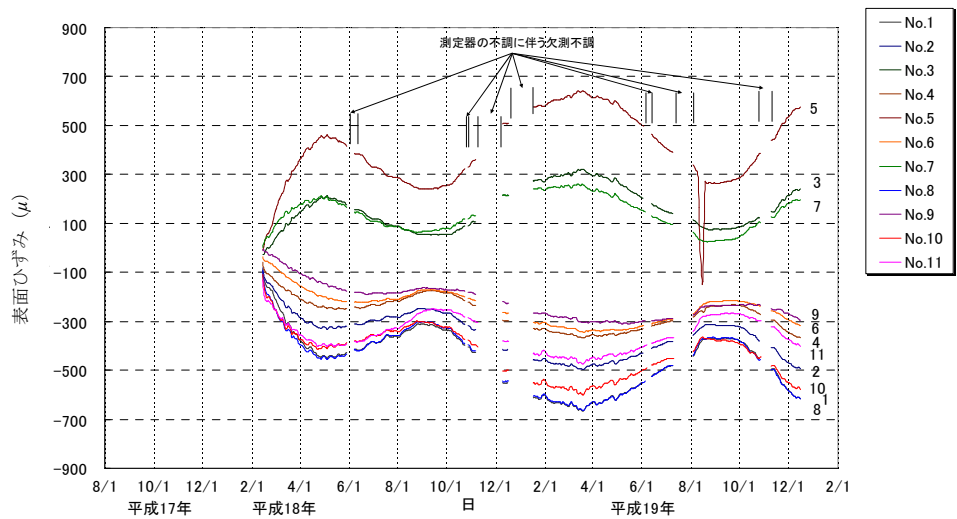


c) 既設側

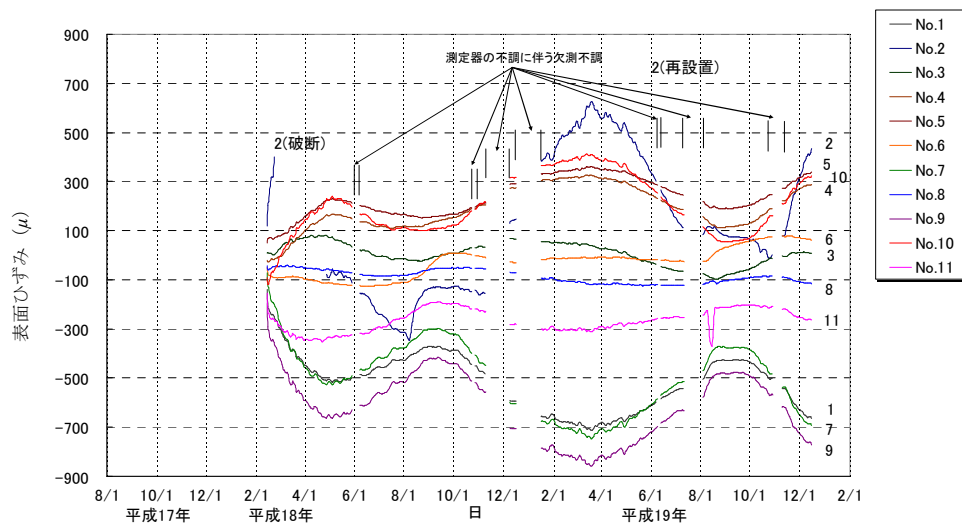
図-5.10 表面ひずみ計計測結果 (夏期施工)



a) つま側



b) 中央部



c) 既設側

図-5.11 表面ひずみ計計測結果（冬期施工）

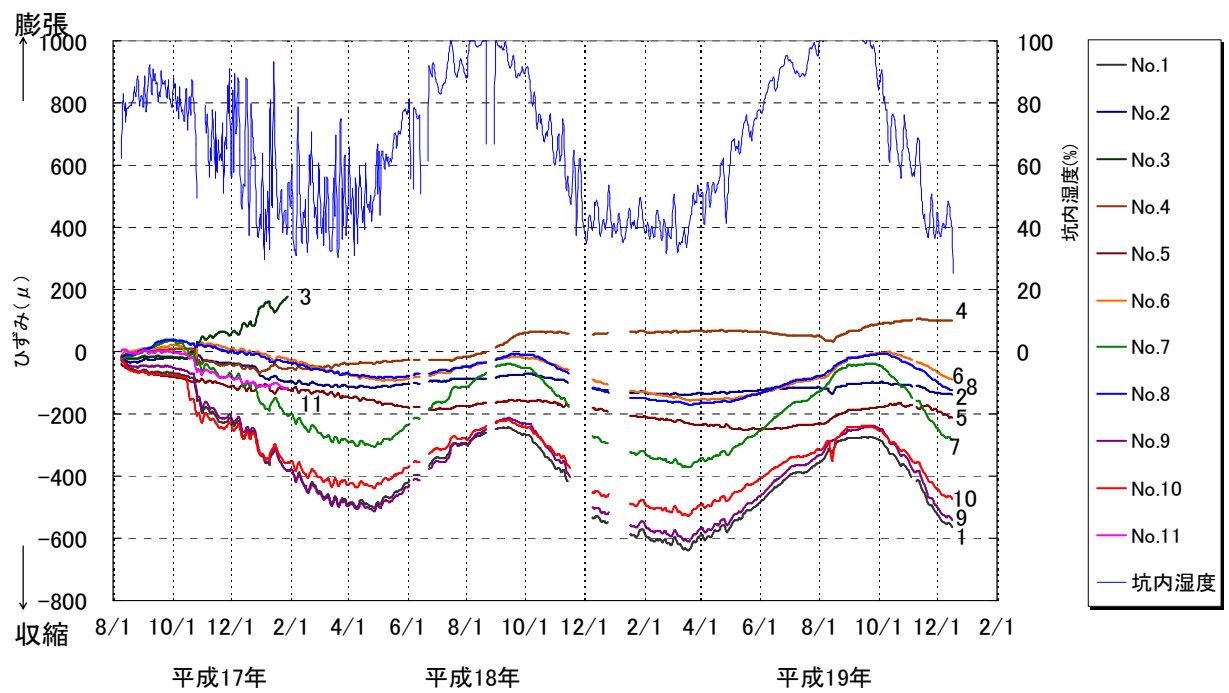


図-5.12 表面ひずみと湿度の関係（夏期施工）

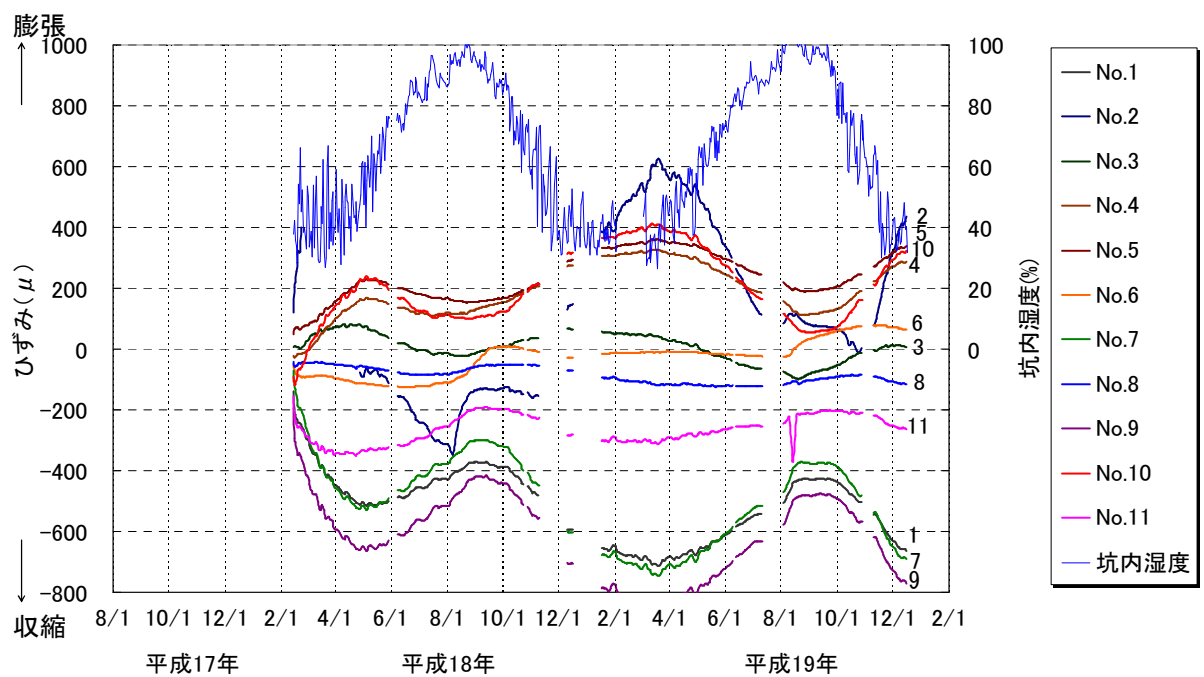


図-5.13 表面ひずみと湿度の関係（冬期施工）

図-5.12、図-5.13に表面ひずみと坑内湿度の経時変化を示す。夏期施工では、平成17年8月に打設後、坑内湿度が低下した秋頃（打設後3ヶ月経過時）からひずみの変動が大きくなり、各年3月～4月に最大収縮ひずみを持つ周期的な変化をし、最大ひずみは約 600μ となっている。各部位の多くは収縮側に推移しているが、中には膨張側に推移したものもある。一方、冬期施工は、平成18年2月の打設直後からひずみは膨張側、収縮側に变化する部位が明確に分かれ、各年3月～5月に最大ひずみを持つ周期的な変化をし、最大ひずみも夏期打設に比較し大きく約 800μ を超えている。コンクリート内部（内空側表面より10cm）の内空側ひずみと比較すると夏期施工は約 100μ 大きく、冬期施工では約 500μ とその差が大きくなっている。

(4) 覆工コンクリート表面のひび割れ発生状況

表面ひずみの計測値と実際のひび割れ状況との関連を調べるため、覆工コンクリートに近接して、ひび割れの目視観察および超音波による直接回折波法を用いてひび割れ深さの測定を行った。夏期施工のひび割れ展開図を図-5.15、冬期施工のひび割れ展開図を図-5.16に示す。また、図-5.17にひび割れ深さの分布を示す。

ひび割れの発生範囲をみると、夏期施工、冬期施工ともに天端部に集中し、かつ、既設側の覆工コンクリートに接する側でひび割れが多く見られた。ひび割れ幅については、夏期打設箇所ではひび割れ幅 0.1mm 未満で狭くかつ長さが短いひび割れが点在しているのに対し、冬期打設箇所では夏期打設箇所に比べひび割れ幅が大きく（ 0.2mm 程度）かつ長いひび割れがみられた。冬期施工スパンの中には、平成19年12月の時点で、ひび割れ幅 1.2mm でトンネル縦断方向に連続するひび割れがみられた。

図-5.17よりひび割れ深さは、夏期施工が $20\sim 130\text{mm}$ 程度であるのに対し、冬期施工では、 $30\sim 200\text{mm}$ 程度と夏期施工に比べて深いことが分かる。なお、青森方のスパンのひび割れ幅 1.2mm のひび割れ深さは 202mm であった。実際の覆工コンクリートの巻厚が $500\sim 600\text{mm}$ であることから、これらのひび割れは覆工コンクリートを貫通していないものと判断される。

ここで、表面ひずみが内部ひずみと異なり、膨張側へ変化している点について考察する。写真-5.1はひび割れの発生位置（冬期施工、天端部、B-B断面）とひずみ計の位置を示したもので、図-5.18は同じ箇所の表面ひずみの変化を示したものである。No.2、No.4、No.5のひずみは膨張側のひずみ値を示しているが、ひずみ計はひび割れと交差ししており、これが表面ひずみの変動要因となることは容易に想像され次のように説明できる。図-5.19にひずみゲージとひび割れの関係の概念図を示す。表面ひずみ計No.5のようなひずみの箇所では、図-5.19(a)のようにひずみゲージを横断するひび割れがあり、ひび割れの影響を受けるために、ゲージは大きく引張側に計測され、膨張側に推移する。表面ひずみ計No.3のようなひずみゲージではひずみの横断がなく、図-5.19(b)のように

ゲージから離れた位置にひび割れがみられるため、コンクリートのひずみを捉え、ひび割れの影響は小さいものと考えられる。

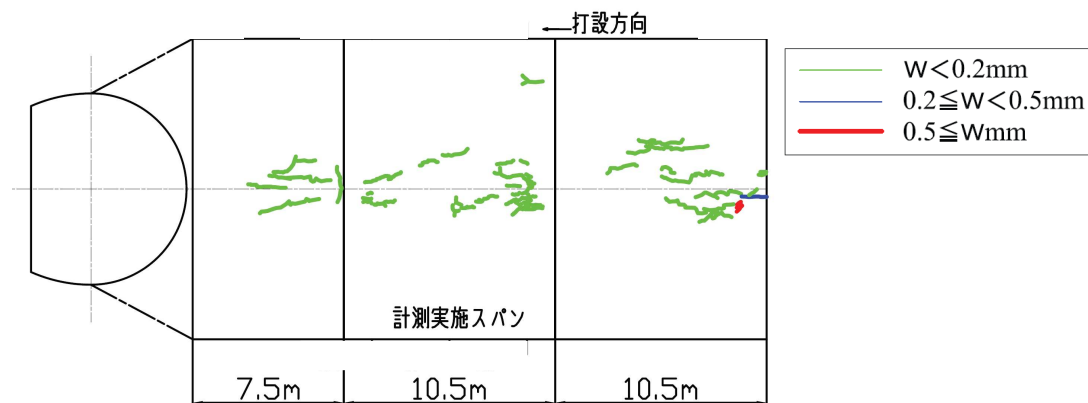


図-5.15 ひび割れの計測箇所（夏期施工）

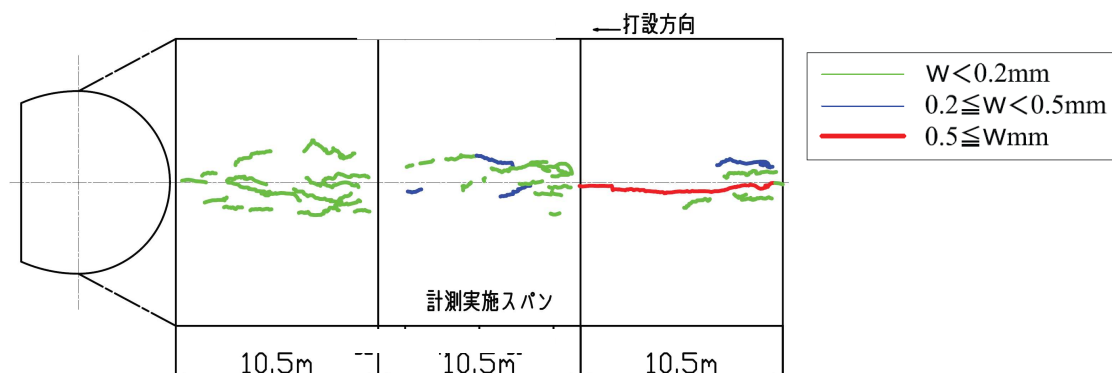


図-5.16 ひび割れの計測箇所（冬期施工）

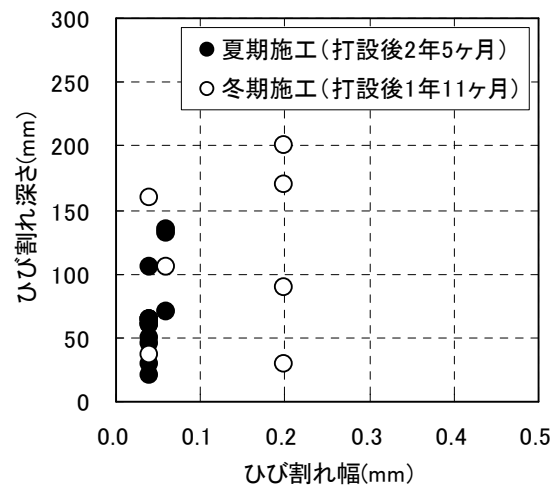


図-5.17 計測実施スパンのひび割れ幅と深さ

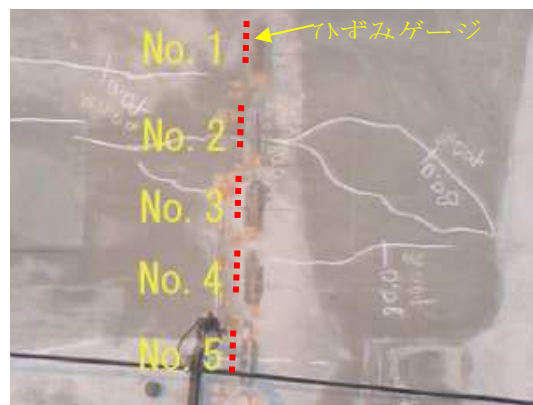


写真-5.1 ひび割れ発生状況（冬期施工、B-B断面）

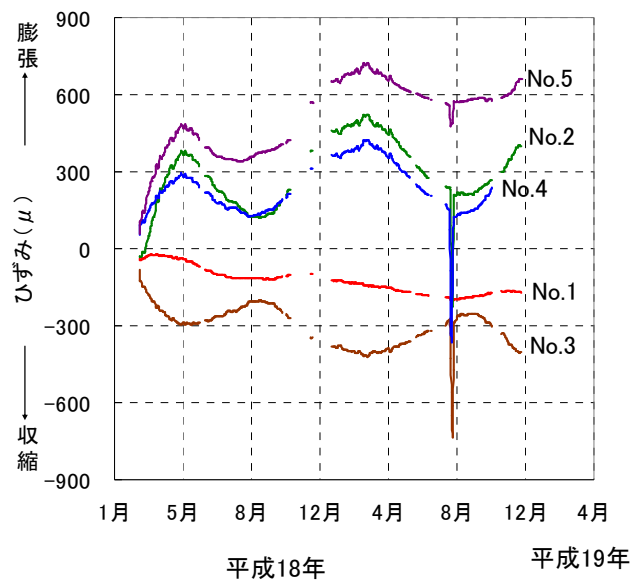


図-5.18 表面ひずみの変化（冬期施工、B-B断面）

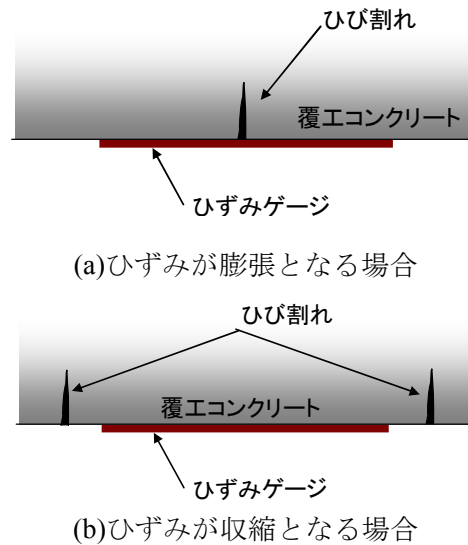


図-5.19 ひずみゲージとひび割れの関係の概念図

5.3 まとめ

内空変位の収束後に打設された覆工コンクリートを対象に、坑内が高温・多湿の夏期施工と低温・乾燥の冬期施工についてひび割れ発生状況、坑内環境とコンクリート内部ひずみ、表面ひずみの計測を実施した。これから得られた成果は、以下のとおりである。

(1) ひび割れ発生状況

- ・ 覆工コンクリートは内空変位収束後に打設されたものであるが、夏期施工、冬期施工でもトンネル天端の軸方向に伸びるひび割れが確認される。
- ・ 夏期施工と冬期施工のひび割れ形態を比較すると、夏期施工のひび割れはひび割れ幅 0.1mm 未満で、かつ長さが短く、ひび割れ深さも比較的小さい。冬期施工のひび割れは、ひび割れ幅 0.2mm 程度のひび割れが多く発生しており、計測スパンに隣接するスパンにおいてはひび割れ幅 1mm 程度の延長の長い縦断ひび割れが見られ、ひび割れ深さも夏期施工と比較して大きい。しかし、ひび割れ深さは、巻厚の最大で 1/4 程度であり、ほとんどが覆工コンクリート表面の浅いひび割れである。

(2) 内部ひずみ

- ・ 内部ひずみは収縮側を示しており、地山側と内空側の差は夏期施工では天端部で最大 50μ 程度、冬期施工では肩部で最大 100μ 程度であった。このことから、覆工コンクリートの内部ひずみは不均一で、ひずみ分布に勾配があることが認められる。
- ・ 脱型時の覆工コンクリート内部ひずみと内部温度を見ると、夏期施工では脱型した時点で内部温度はピークに達し、時間の経過とともに温度が低下した。一方、冬期施工では、脱型時では、まだ増加傾向にあり環境条件の違いを示して

いる。また、冬期施工では夏期施工に比べ、脱型時に収縮側のひずみが顕著に現れている。なお、コンクリートの強度試験の結果では、28 日強度に差はないが、初期材齢（材齢 15 時間）において冬期施工の方が夏期施工に比べ、強度が低く、強度発現に違いが生じている。

(3) 表面ひずみ

- ・ 表面ひずみは、内空側ひずみと比較して、夏期施工で約 100μ 、冬期施工で約 500μ 大きくなっており、コンクリート表面と内空側のひずみ差は、コンクリート内部（内空側と地山側）のひずみ差に比べて大きい。
- ・ 夏期施工では脱型後に坑内湿度、坑内温度が急激に変化した時に表面ひずみの変動が大きく発生した。一方、冬期施工では、脱型直後から表面ひずみが大きく変動している。ひずみゲージとひび割れ発生の関係から表面ひずみの急激な変動の際に、ひび割れが入っていると考えられることから、坑内湿度、坑内温度の急激な変化に伴って、ひび割れがコンクリート表面に発生すると考えられる。

以上のことから、覆工コンクリートの初期ひび割れの特徴と発生要因は、次のとおりにとまとめられる。

- ・ 超音波によるひび割れ深さの測定結果および内部ひずみ、表面ひずみの測定結果から、初期ひび割れは、表面付近に発生する浅いひび割れであると分かる。
- ・ 覆工コンクリートは、内部ひずみに地山側と内空側の差が生じており、冬期施工が夏期施工より大きなひずみ差であることが確認された。この内部ひずみの差が初期ひび割れに影響していると考えられる。これは、第 4 章の模型試験の結果とも合致している。
- ・ 表面ひずみの発生状況から坑内湿度、坑内温度の急激に変化した際に変動が大きくなっていることから、坑内湿度、坑内温度がひび割れ発生に影響していると考えられる。

これらは、八甲田トンネルの計測結果による定性的なものであるため、数値解析により上記結果の検証を行うこととする。

参考文献

- 1) 馬場弘二, 伊藤哲男, 佐野信夫, 谷口裕史, 杉山律, 福留和人 : 覆工コンクリート模擬モデルによるひび割れ抑制対策比較試験, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 2, PP. 285-295, 2006

第6章 覆工コンクリートの初期性状に関する解析

6.1 概説

背面地山の拘束によるひび割れを表現できる数値解析は、これまでも多くの指針類で解析手法やパラメータの選定方法が提案されている^{1)~3)}。しかし、現時点では、第4章および第5章で同定したひび割れ発生原因である覆工コンクリートの収縮の不均一性を表現する解析手法やパラメータの選定方法を提案、適用する事例はない。また、模型試験や現地計測は安全面や経済面から数量が限られる場合が多いため、無数の影響因子が複雑に絡み合う覆工コンクリートの評価では、ある程度、数値解析に頼らざるを得ない現状もある。

本章では、まず、第4章の模型試験から同定したひび割れ発生メカニズムを表現できる解析方法・パラメータの選定方法を提案し、妥当性を検証する。その後、第5章の実トンネルでの計測結果を用いて、実トンネルでの適用の検証を行う。さらに、様々な施工条件・坑内環境におけるひび割れ発生状況を示し、ひび割れ発生に影響を与える要因の検討を行う。

6.2 ひび割れ発生メカニズムに関する解析手法

6.2.1 土木学会式による評価法

第2章で示したように、通常、覆工コンクリートに求められる要求性能は、支保工の安全率の向上や内装機能等、力学的機能を多く付加しない場合が多い。よって、覆工コンクリートの初期性状の挙動を表現する場合には、外力を考慮せずに、内部ひずみの変動と境界条件を精度よく表現できるモデルとする場合が多い。

新たに、ひび割れ発生メカニズムを表現しようとする場合には、材齢とともに増加するコンクリートの圧縮強度や引張強度、ヤング係数等の力学的特性およびコンクリートの水和熱による断熱温度上昇特性や、周辺の温度変化、湿度変化に伴って発生する熱の移動に関するコンクリートの膨張、収縮の挙動を考慮する必要がある。

これまで、コンクリートの熱に関する膨張、収縮の挙動や乾燥に関する挙動の評価は、一般に、土木学会の「2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕」より提案されている式が用いられている⁴⁾。この場合の解析の流れを図-6.1に示す。

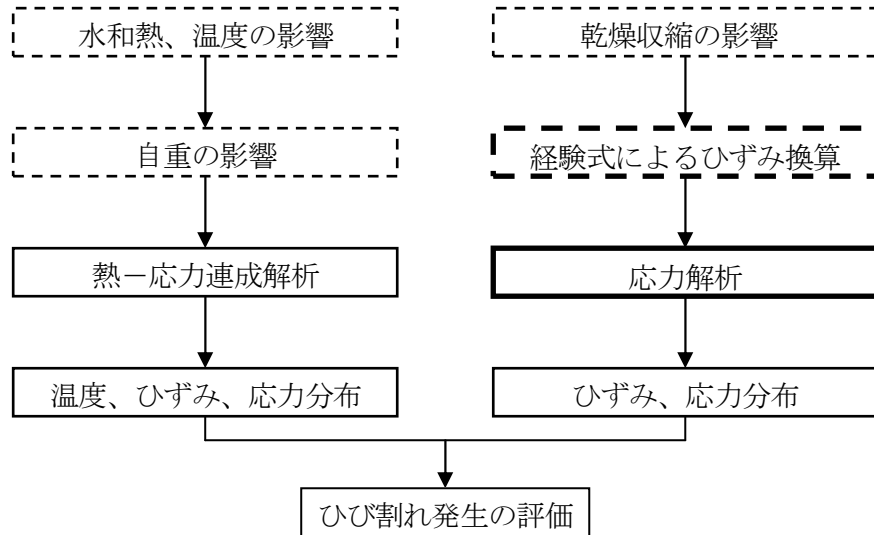


図-6.1 土木学会式による評価法

この手法は、まず、コンクリートの水和熱、温度および自重による影響を熱-応力連成解析にて求め、次に、乾燥収縮の影響を経験式からひずみ換算、応力解析にて求めることとなっている。この場合の、特に乾燥収縮に関する定式を式-6.1～6.5に示す⁴⁾。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (\text{式-6.1})$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (\text{式-6.2})$$

$$\varepsilon'_{ds\infty} = \frac{\varepsilon'_{ds\rho}}{1 + \eta \cdot t_0} \quad (\text{式-6.3})$$

$$\varepsilon'_{ds\rho} = \frac{11 \times (1 - RH)W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad (\text{式-6.4})$$

$$\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\} \quad (\text{式-6.5})$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ ：材齢 t の乾燥収縮ひずみ (μ)

$\varepsilon'_{ds\infty}$ ：乾燥収縮の最終ひずみ (μ)

t_0 および t ：乾燥収縮開始および乾燥中のコンクリート有効材齢 (日)

W ：単位水量 (kg/m^3)

V/S ：体積表面積 (mm)

RH ：相対湿度 (%)

$f'_c(28)$ ：材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

ひび割れ発生の評価については、熱-応力連成解析による熱応力と乾燥収縮による応力の和をコンクリートの引張強度と比較することで行う。なお、本論文ではこの熱-応力連成解析によるひずみ、応力解析および、ひび割れ発生の評価までを「土木学会式による評価法」と称する。

この方法においては、水和熱、温度および自重による影響としてコンクリート表面とコンクリート内部の不均一性を表現しているものの、乾燥収縮の影響としてはコンクリート内部で同様と仮定している。なお、圧縮強度が 55N/mm^2 以下の普通コンクリートでは、セメントの水和に起因した自己収縮が小さく、無視できる場合があることが指摘されている⁴⁾。

6.2.2 湿気移動を考慮した評価法

トンネルの覆工コンクリートは周長に対して厚さが小さい薄肉構造であると言える。そのため、コンクリートの乾燥収縮の不均一性を考慮する必要がないとされてきた。しかしながら、第4章の結果から、コンクリート断面内のひずみの不均一性がコンクリート表面のひび割れ発生の一因であることが想定されることから覆工コンクリートのような薄肉構造の場合でも、コンクリート断面内の乾燥収縮の不均一性を考慮した解析を行うことが望ましいと考えた。また、覆工コンクリートの地山側と内空側では、乾燥に関する境界条件が極端に異なることも背景にある。

コンクリートの乾燥収縮に関する断面内の不均一性を考慮する方法としては、籠橋ら⁵⁾、堀部ら⁶⁾、小澤ら⁷⁾の研究がある。この手法は、コンクリート中の水分移動を見かけの湿気移動と仮定し、コンクリート中の蒸気圧を未知数とする支配方程式を定式化したものである。

本論文では、この手法を取り入れることとし、その評価の流れを図-6.2 に示す。すなわち、まず、水和熱、温度および自重による影響として熱-応力連成解析から温度、ひずみ、応力分布を求める。次に、乾燥収縮の影響として湿気-応力連成解析から湿度、ひずみ、応力分布を求める。そして、これらの和がコンクリートの引張強度を超えるか否かでひび割れ発生の評価を行うものである。なお、本論文ではこの熱-応力連成解析と湿気-応力連成解析によるひずみ、応力解析、およびひび割れ発生の評価までを、「湿気移動を考慮した評価法」と称することとする。

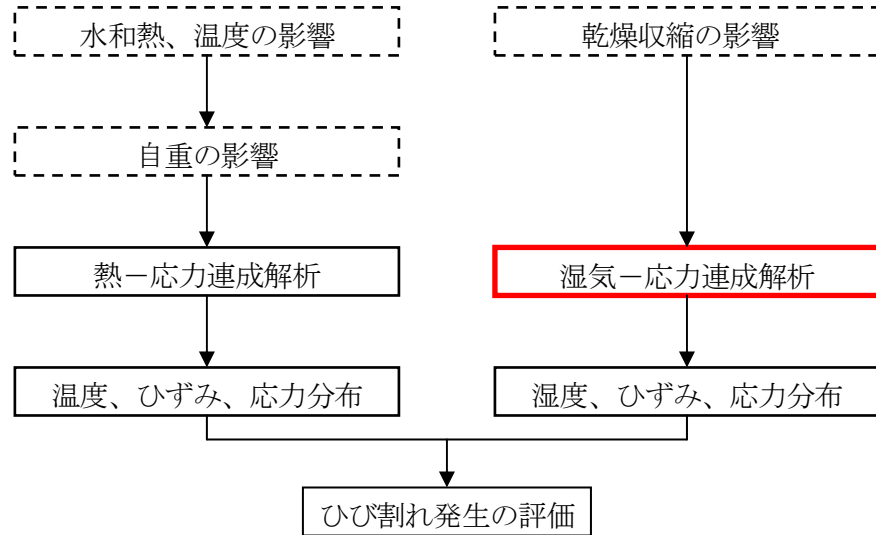


図-6.2 湿気移動を考慮した評価法

以下に、湿気-応力連成解析の定式を示す。コンクリート中の湿気移動は式-6.6 で表現され、湿気移動がコンクリート中の蒸気圧勾配により生じると定義するものである⁵⁾。

$$J = -\lambda_p S \frac{dP}{dn} \quad (\text{式-6.6})$$

ここに、 J : 湿流 (g/s)

λ_p : 透湿率 (g/m·s·Pa)

S : 湿流が通過する面積 (m²)

P : 蒸気圧 (Pa)

n : 湿気移動距離 (m)

式-6.6 の湿気移動則から、次の非線形支配方程式 式-6.7 が導かれる⁵⁾。

$$\left(\frac{dq}{dP} \right)_p \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_p \nabla P) = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (\text{式-6.7})$$

なお、境界条件として式-6.8 が仮定される⁵⁾。

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P - P_c) \quad (\text{式-6.8})$$

ここに、 q : 湿気密度 (g/m³)

t : 時間(s)
 $(dq/dp)_p$: 湿気容量(g/m³·Pa)
 α : 蒸発率(g/m²·s·Pa)
 P_c : コンクリート周囲の蒸気圧(Pa)

一方、コンクリート内部の蒸気圧 P と相対湿度 RH との関係は式-6.9で表現される⁶⁾。

$$RH = \frac{P}{P^*} = \frac{P}{610.78 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}}} \quad (\text{式-6.9})$$

ここに、 P^* : 温度 T (K)での飽和蒸気圧(Pa)
 T : 絶対温度(K)
 T_c : 温度(°C)

である。

式-6.6～6.9を用いて、最終的に乾燥収縮ひずみ量 ε_{sh} は式-6.10の通りとなる⁷⁾。

$$\varepsilon_{sh} = -\frac{A_s}{E_c} \cdot \frac{RT \cdot \ln(RH)}{\nu} \quad (\text{式-6.10})$$

ここに、 A_s : 収縮駆動力の作用程度に関する係数
 ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ
 E_c : ヤング係数(N/mm²)
 R : 気体定数(8.3143J/K·mol)
 T : 絶対温度(K)
 ν : 水分子の比容積(1.8202×10⁻⁵m³/mol)
 RH : 相対湿度

なお、コンクリートの透湿率 λ_p と湿気容量 $(dq/dp)_p$ は、西岡、原田の研究⁸⁾を参考とし、蒸発率 α と収縮駆動力の作用程度に関する係数 A_s については、堀部ら⁶⁾、小澤ら⁷⁾の研究を参考とした。これらのパラメータを図-6.3に示す。

第4章で示した表-4.2中の模型試験標準ケース(Case1)においては、図-6.3より、透湿率 λ_p は47.8～167.1×10⁻⁹g/m·s·Pa、湿気容量 $(dq/dp)_p$ は18.8～136.8g/m³·Pa、蒸発率 α は0.6～4.2×10⁻⁶g/m²·s·Pa、収縮駆動力の作用程度に関する係数 A_s は0.25となる。

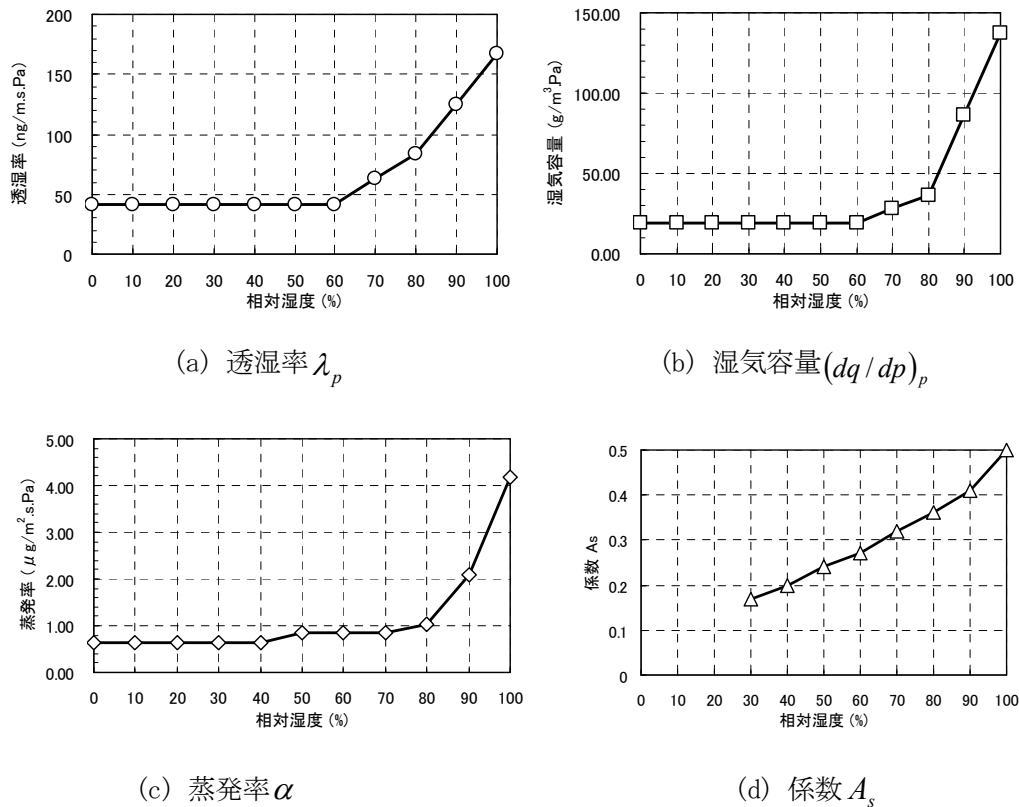


図-6.3 湿気－応力連成解析および乾燥収縮ひずみ解析のパラメータ

6.3 乾燥収縮ひずみに関する予測方法の比較

6.2節で述べた2つの乾燥収縮ひずみの予測方法において、第4章で示した表-4.2中の模型試験標準ケース (Case1) の条件で比較解析を行うこととした。図-6.4は湿気－応力連成解析に使用した簡易モデルである。このモデルでは、地山側が背面シート等による断湿状態とし、コンクリート内部の湿気移動はX方向のみで、トンネル内空側に移動することを想定した。湿気はコンクリートが連続しているY方向に移動しないため、Y方向の境界条件は断湿状態となる。

この簡易モデルを用いて、乾燥収縮量（ひずみ）を式-6.1～6.5による土木学会式によって求めた場合と、式-6.6～6.10による湿気－応力連成解析によって求めた場合の比較を図-6.5に示す。

模型試験で設定した最終材齢である70日経過後において、土木学会式による乾燥収縮ひずみは 272μ で、断面内で一様であるという評価になるのに対して、湿気－応力連成解析による乾燥収縮ひずみは、コンクリート表面で 337μ 、表面からの距離300mmの内部の位置で 12μ となり、断面内で不均一な分布を得ることができた。また、1年経過後においても、それぞれ乾燥収縮ひずみの量が増大するが、断面内のひずみ分布は同様な傾向であった。なお、約3年間経過した後では、いずれもほぼ断面内で一様の乾燥収縮ひずみとなったが、ひずみ量は土木学会式で 710μ であったのに対し、湿気－応力連成解析では 900μ に達した。

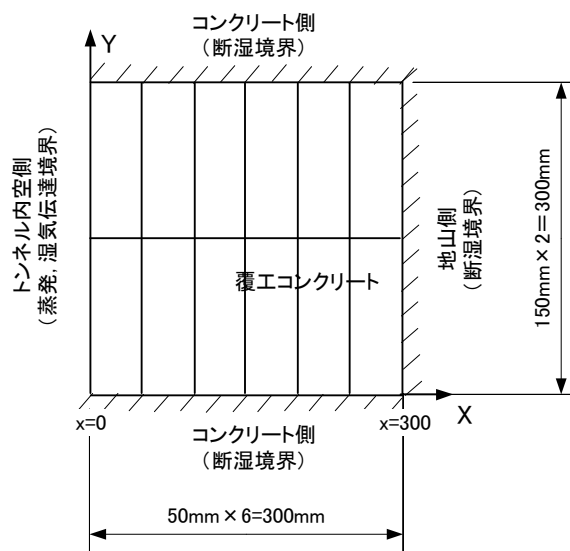


図-6.4 湿気-応力連成解析の解析モデル

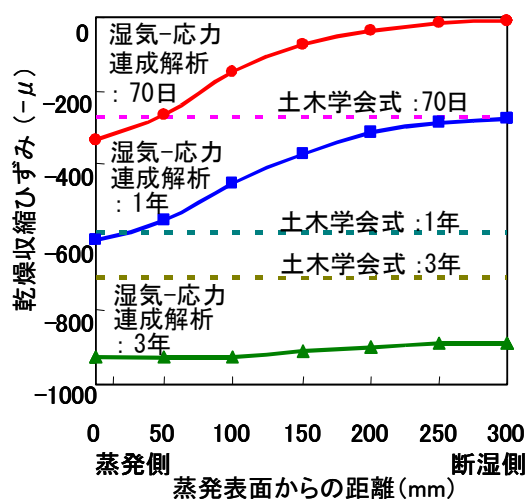


図-6.5 コンクリート内部の乾燥収縮ひずみ分布の比較

また、図-6.6には、湿気 - 応力連成解析および土木学会式から算定した乾燥収縮ひずみの最終値 ϵ_{sh} と外気湿度の関係を示す。土木学会式による乾燥収縮と外気湿度の関係は線形である。これに対して、湿気 - 応力連成解析による乾燥収縮と外気湿度の関係は非線形で、外気湿度が低くなるほど一定の相対湿度低下に対する乾燥収縮量が小さくなる傾向にある。

以上の結果より、湿気-応力連成解析ではコンクリートの初期における断面内の乾燥の不均一性と材齢による乾燥収縮の過程を示すことができる。

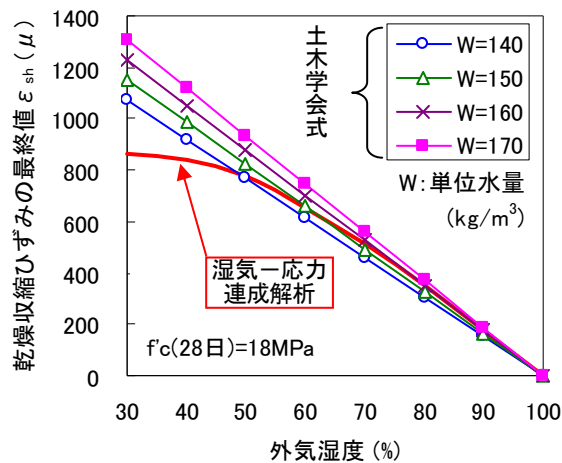


図-6.6 乾燥収縮ひずみと外気湿度との関係

6.4 コンクリートの応力度評価

6.5 節以降で実施する模型試験および現地計測に関する解析を実施する際に用いるための、コンクリートの応力度評価について、以下に示す⁹⁾。

6.4.1 コンクリートの温度・収縮ひび割れ発生メカニズム

温度上昇・降下時および乾燥収縮時に内部・外部拘束により発生する材齢 t におけるコンクリート応力 $\sigma(t)$ は、式-6.11～6.13 を用いて求めることができる。

$$\varepsilon_f(t) = \varepsilon_T(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (\text{式-6.11})$$

$$\varepsilon_{ef}(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_f(t) \quad (\text{式-6.12})$$

$$\sigma(t) = E_c(t) \cdot \varepsilon_{ef}(t) \quad (\text{式-6.13})$$

ここに、 $\varepsilon_f(t)$ ：自由ひずみ(拘束がないときに発生するひずみ)

$\varepsilon_T(t) = \alpha \cdot \Delta T$ ：温度ひずみ

α ：線膨張係数($1/^\circ\text{C}$)

ΔT ：温度変化($^\circ\text{C}$)

$\varepsilon_{sh}(t)$ ：乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{ef}(t)$ ：拘束ひずみ(拘束があることにより収縮できなかった分のひずみ)

$\varepsilon(t)$ ：発生ひずみ(実際に発生したひずみ)

$\sigma(t)$ ：コンクリートの応力(N/mm^2)

$E_c(t)$ ：コンクリートのヤング係数(N/mm^2)

このように、コンクリートに発生する応力に影響するのは、拘束により発生しないひずみ(拘束ひずみ)であり、実際に現れたひずみではないことが重要である。完全な拘束の状態ではひ

ずみが発生しないため、拘束ひずみは自由ひずみと一致する。また、発生する応力は、拘束ひずみにコンクリートのヤング係数を乗じたものとなる。

一方、完全に拘束がない状態で実際に発生したひずみは自由ひずみと一致し、応力は発生しない。ひび割れは、温度降下、乾燥収縮時に内部・外部拘束により発生するコンクリート応力がコンクリートの引張強度を上回る時に発生することになる。

以下の表-6.1～6.3 に、温度、ひずみ、応力の関係を示す。

表-6.1 温度ひずみのみ発生し、外部拘束を考慮した場合

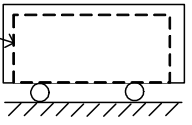
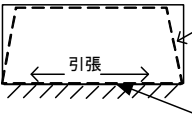
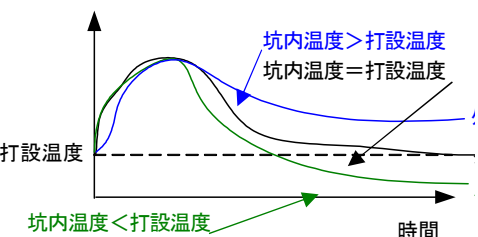
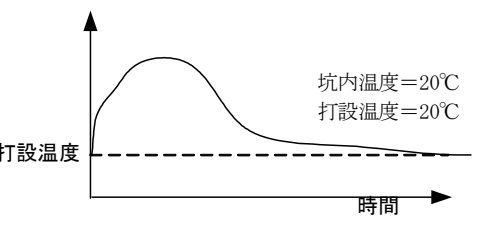
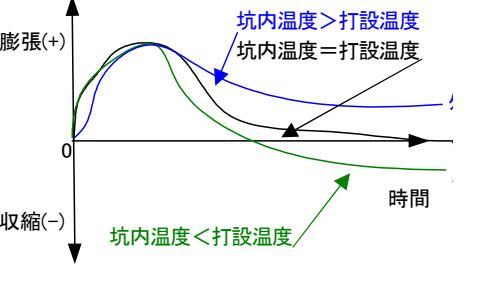
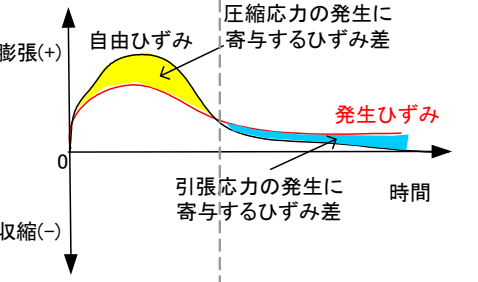
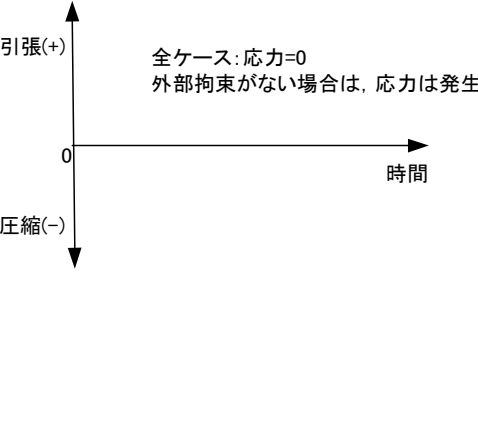
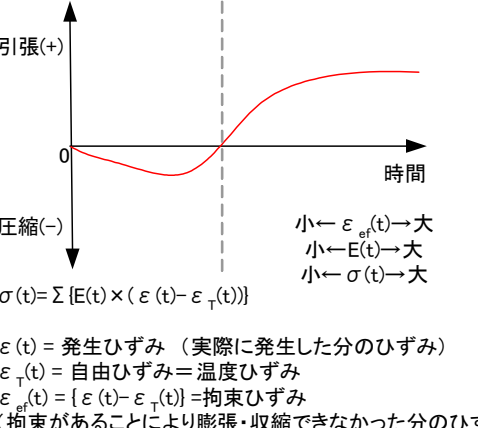
<p>コンクリート収縮後</p>  <p>(a) 無拘束コンクリート 発生ひずみ=自由ひずみ</p>	<p>コンクリート収縮後</p>  <p>(b) 外部拘束コンクリート 発生ひずみ≠自由ひずみ</p>
<p>温度(°C)</p>  <p>坑内温度>打設温度 坑内温度=打設温度 坑内温度<打設温度</p> <p>打設温度</p> <p>時間</p>	<p>温度(°C)</p>  <p>坑内温度=20°C 打設温度=20°C</p> <p>時間</p>
<p>ひずみ</p> <p>膨張(+)</p>  <p>坑内温度>打設温度 坑内温度=打設温度 坑内温度<打設温度</p> <p>0</p> <p>収縮(-)</p> <p>時間</p>	<p>ひずみ</p> <p>膨張(+)</p>  <p>自由ひずみ 発生ひずみ 引張応力の発生に寄与するひずみ差 圧縮応力の発生に寄与するひずみ差</p> <p>時間</p>
<p>応力</p> <p>引張(+)</p>  <p>全ケース: 応力=0 外部拘束がない場合は、応力は発生しない。</p> <p>0</p> <p>圧縮(-)</p> <p>時間</p>	<p>応力</p> <p>引張(+)</p>  <p>0</p> <p>圧縮(-)</p> <p>時間</p> <p> $\sigma(t) = \sum [E(t) \times (\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t))]$ $\varepsilon(t)$ = 発生ひずみ (実際に発生した分のひずみ) $\varepsilon_T(t)$ = 自由ひずみ=温度ひずみ $\varepsilon_{ef}(t) = \{\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t)\}$ = 拘束ひずみ (拘束があることにより膨張・収縮できなかった分のひずみ) </p> <p> 小←$\varepsilon_{ef}(t)$→大 小←$E(t)$→大 小←$\sigma(t)$→大 </p>

表-6.2 温度ひずみおよび乾燥収縮ひずみが発生し、外部拘束のみ考慮した場合

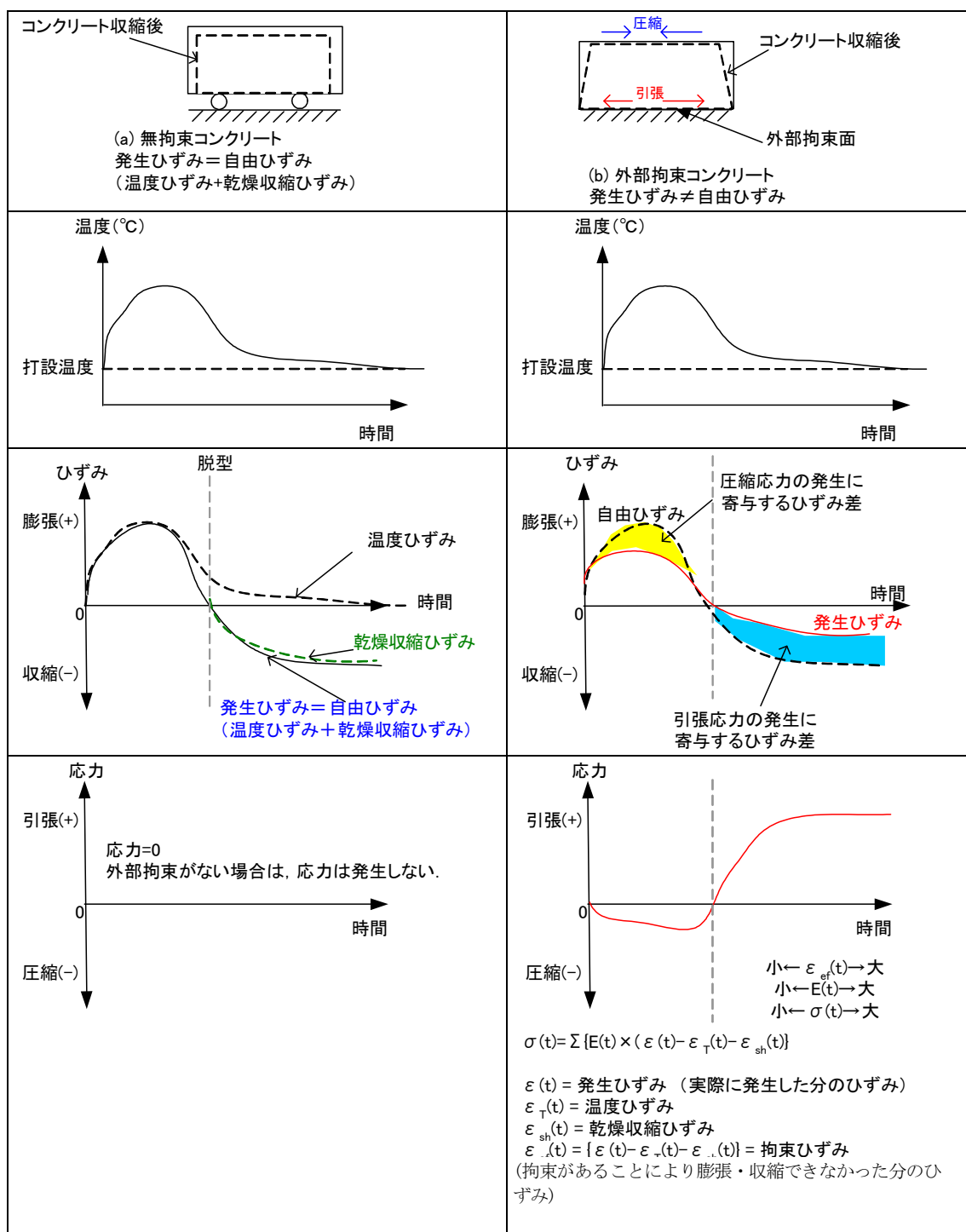
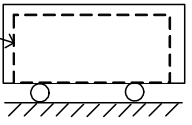
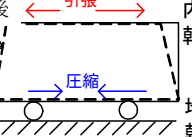
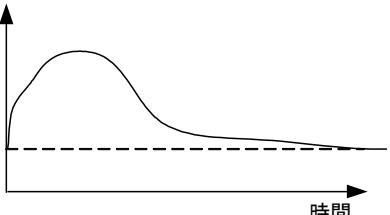
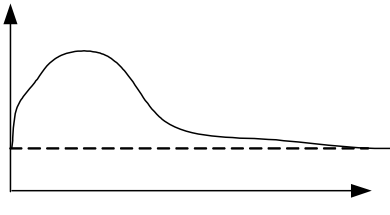
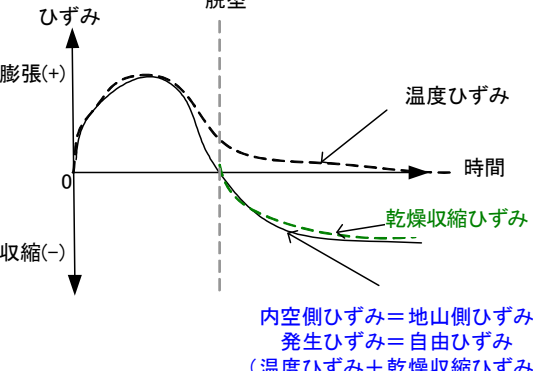
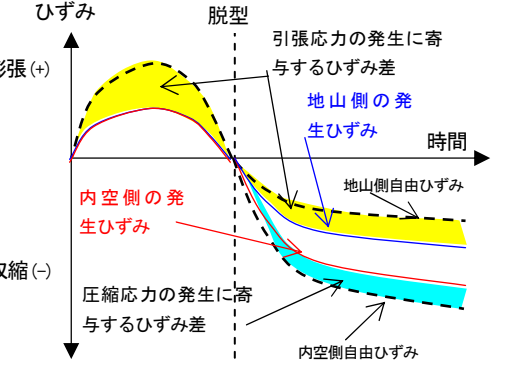
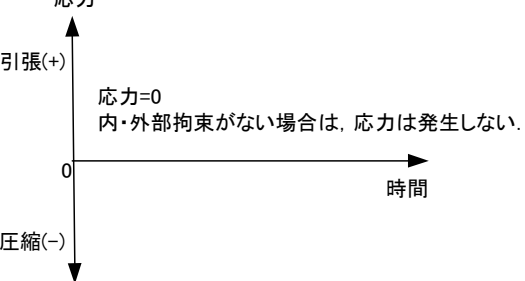
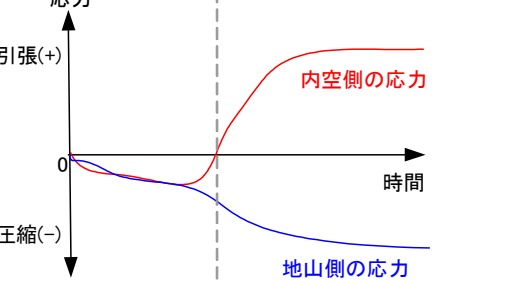


表-6.3 温度ひずみおよび乾燥収縮ひずみが発生し、内部拘束のみ考慮した場合

<p>コンクリート収縮後</p>  <p>(a) 断面一様の乾燥収縮を考慮した場合 → 内部拘束が発生しない (無拘束コンクリートと同様) 発生ひずみ = 自由ひずみ</p>	<p>コンクリート収縮後</p>  <p>内空側: 乾燥収縮の速度は早い 地山側: 乾燥収縮の速度は遅い</p> <p>(b) 不均一乾燥収縮を考慮した場合 → 内部拘束が発生する (内部拘束コンクリート) 発生ひずみ ≠ 自由ひずみ</p>
<p>温度(°C)</p>  <p>打設温度</p> <p>時間</p>	<p>温度(°C)</p>  <p>打設温度</p> <p>時間</p>
<p>ひずみ</p> <p>膨張(+)</p> <p>収縮(-)</p> <p>脱型</p>  <p>温度ひずみ</p> <p>乾燥収縮ひずみ</p> <p>内空側ひずみ = 地山側ひずみ 発生ひずみ = 自由ひずみ (温度ひずみ + 乾燥収縮ひずみ)</p>	<p>ひずみ</p> <p>膨張(+)</p> <p>収縮(-)</p> <p>脱型</p>  <p>引張応力の発生に寄与するひずみ差</p> <p>地山側の発生ひずみ</p> <p>地山側自由ひずみ</p> <p>内空側の発生ひずみ</p> <p>内空側自由ひずみ</p> <p>圧縮応力の発生に寄与するひずみ差</p>
<p>応力</p> <p>引張(+)</p> <p>圧縮(-)</p> <p>応力=0</p> <p>内・外部拘束がない場合は、応力は発生しない。</p>  <p>時間</p>	<p>応力</p> <p>引張(+)</p> <p>圧縮(-)</p>  <p>内空側の応力</p> <p>地山側の応力</p> <p>時間</p> <p> $\sigma(t) = \sum [E(t) \times (\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t) - \varepsilon_{sh}(t))]$ </p> <p> $\varepsilon(t)$ = 発生ひずみ (実際に発生した分のひずみ) $\varepsilon_T(t)$ = 温度ひずみ $\varepsilon_{sh}(t)$ = 乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{ef}(t) = \{\varepsilon(t) - \varepsilon_T(t) - \varepsilon_{sh}(t)\}$ = 拘束ひずみ (拘束があることにより膨張・収縮できなかった分のひずみ) </p> <p> 小 ← $\varepsilon_{ef}(t)$ → 大 小 ← $E(t)$ → 大 小 ← $\sigma(t)$ → 大 </p>

6.4.2 コンクリートの熱特性

一般のコンクリートでは、熱伝導率は $2.6 \sim 2.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 、比熱は $1.05 \sim 1.26 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、熱拡散率は $0.83 \sim 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

また、コンクリートの断熱温度上昇特性の物性値は、水和遅延効果が顕著な混和剤および混和材料を用いない場合には、式-6.14 で表すことができる¹⁾。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-rt}) \quad (\text{式-6.14})$$

ここに、 Q_∞ ：終局断熱温度上昇量($^\circ\text{C}$)

r ：温度上昇速度に関する係数

t ：材齢(日)

$Q(t)$ ：材齢 t 日における断熱温度上昇量($^\circ\text{C}$)

普通ポルトランドセメントを用いる場合の Q_∞ 、 r の値を表-6.4 に示す。ここに、 C は単位セメント量(kg/m^3)である。

表-6.4 式-6.14 における Q_∞ 、 r の標準値⁹⁾

セメント種類	打込む時間の温度($^\circ\text{C}$)	$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-rt})$			
		$Q_\infty = aC + b$		$r = gC + h$	
		A	b	G	h
普通ポルトランドセメント	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337

熱伝導率は、部材表面部のコンクリート温度に大きな影響に及ぼし、部材厚が比較的小さい場合には内部温度上昇にも影響を及ぼす。風速の影響は普通のコンクリートの露出面では、風速 $2 \sim 3 \text{ m/s}$ の場合、熱伝達率 $12 \sim 14 \text{ W/m}^2\text{C}$ であり、風速の増加に伴い、熱伝達率は増加し、その増加割合の目安は風速 1 m/s 当たり $2.3 \sim 4.6 \text{ W/m}^2\text{C}$ 程度である。

6.4.3 コンクリートの力学特性

(1) コンクリートの圧縮強度、引張強度

コンクリート材齢の変化に伴うコンクリートの圧縮強度、引張強度は式-6.15、6.16 で求めることができる⁹⁾。

$$f'_c(t) = \{t / (a + bt)\} \times d(i) \times f'_{ck} \quad (\text{式-6.15})$$

$$f'_{tk}(t) = c\sqrt{f'_c(t)} \quad (\text{式-6.16})$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$f'_{tk}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度(N/mm²)

f'_{ck} ：コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

t ：材齢(日)

i ：設計基準強度の基準材齢(日)、 $i=28$ または 91

a 、 b ：セメントの種類による定数

普通ポルトランドセメントの場合は $a=4.5$ 、 $b=0.95$ とする。

c ：コンクリートの乾燥の程度等によって異なるが、0.44 を基準とする。

d ：材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度の増加率であり、普通ポルトランドセメントでは 1.11 とする。

(2) コンクリートのヤング係数

温度上昇時におけるクリープの影響が小さい場合、コンクリート材齢の変化に伴うコンクリートのヤング係数は式-6.17 で求めることができる⁹⁾。

$$E(t) = 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f'_c(t)} \quad (\text{式-6.17})$$

ここに、 $E(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートのヤング係数(N/mm²)

$f'_c(t)$ ：式-6.15 による材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度(N/mm²)

6.5 模型試験の解析

解析手法の妥当性を検証することを目的に、第4章で述べた模型試験に関する解析を実施することとした。本論文での解析手法が従来の解析手法と異なる点は、6.2節で述べたように、コンクリートの乾燥収縮の評価に「湿気－応力連成解析」を使用する点にある。ここでは、模型試験の乾燥・放熱挙動を把握、解明するため、二次元数値解析手法である湿気移動を考慮した評価法を提案するとともに、パラメータスタディを実施した。

6.5.1 模型試験の解析モデル、条件

6.2 節で示した土木学会式を用いた評価法、湿気移動を考慮した評価法の二種類の方法を用いて、模型試験の標準ケース (Case1) と湿度低下のケース (Case2) の解析を実施する。解析ケースを表-6.5 に示す。ここでは、乾燥収縮の予測方法 (Case I、II)、坑内湿度の違い (Case II、III)、および覆工コンクリートの背面拘束状況 (Case IV、V) に関する影響の解析検討を行った。なお、全ケースで水和熱による温度膨張、収縮を考慮した。

図-6.7 に解析モデルを、表-6.6 に解析に用いた材料特性、養生、環境条件を示す。覆工コンクリートおよび吹付けコンクリートは、平面ひずみ要素で、背面シートは引張力を負担しない法線方向のばね要素とした。また、背面シートによる接線方向の拘束はないものと仮定した。なお、背面シートがない場合は覆工コンクリートと吹付けコンクリートは剛結であるとした (Case V)。その他の条件、材料物性値、養生条件、環境条件については模型試験の実績および参考文献^{5~8)}に基づいて設定した。

解析ステップは表-6.7 に示すとおりであり、コンクリートの凝結開始時間は、打設完了 8.5 時間後 (コンクリートの凝結時間試験法 (JIS A 1147) による) とした。

表-6.5 模型試験の解析ケース

Case	背面シート	評価手法	坑内湿度	備考
I	あり	土木学会式による評価法	60%	試験 Case1
II		湿気移動を考慮した評価法	60%	試験 Case1
III			50%	試験 Case2
IV	なし	温度収縮は考慮し、乾燥収縮は考慮しない	—	温度収縮のみ
V			—	地山側の拘束

表-6.6 模型試験の解析に用いた材料特性、養生、環境条件

項目	記号	単位	坑内湿度	
			60%	50%
●覆工コンクリート				
セメントの種類	－	－	普通ポルトランドセメント	
単位セメント量	C	kg/m ³	303	
単位水量	W	kg/m ³	182	
水セメント比	W/C	%	60	
密度	ρ_c	kg/cm ³	2.25	
28日強度	$f'_c(28)$	N/mm ²	26.9	
圧縮強度	$f'_c(t)$	N/mm ²	$f'_c(t)=t/(4.50+0.95t) \cdot 1.1 \cdot f'_c(28)$	
引張強度	$f_{tk}(t)$	N/mm ²	$f_{tk}(t)=0.44 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	
ヤング係数	$E_e(t)$	kN/mm ²	$E_e(t)=4.7 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	
ポアソン比	ν	－	0.2	
線膨張係数	α	/°C	10×10 ⁻⁶	
比熱	C_c	kJ/kg・°C	1.15	
熱伝導率	λ_c	W/m・°C	2.7	
打設温度	－	°C	15	
断熱温度上昇特性	$Q(t)$	°C	45.80(1- $e^{-1.50t}$)	
厚さ	tc	mm	300	
透湿率	λ_p	ng/m ² ・s・Pa	41.8～167.1	
湿気容量	$(dq/dP)_P$	g/m ³ ・Pa	18.8～136.8	
蒸発率	α	μg/m ² ・s・Pa	0.6～4.2	
収縮駆動力係数	A_s	－	0.25	0.22
●養生条件				
型枠	－	－	メタルフォーム	
脱型時間	－	時間	15	
熱伝達率(内空側)	η	W/m ² ・°C	10	
●環境条件				
坑内温度	T	°C	20	
坑内湿度	RH	%	60	50
●吹付けコンクリート				
密度	ρ_c	kg/cm ³	2.15	
ヤング係数	E_m	kN/mm ²	22	
ポアソン比	ν	－	0.2	
●防水シート				
厚さ	t	mm	1	
圧縮ばね定数(単位面積あたり)	k_c	MN/m ³	20	
引張ばね定数(単位面積あたり)	k_t	MN/m ³	0	

表-6.7 解析ステップ

解析ステップ	時間	備 考
①打設完了	0.0時間	
②凝結開始	8.5時間	覆工コンクリート応力の発生
③脱型	15時間	覆工コンクリート自重の作用
④乾燥収縮開始	15時間	
⑤解析終了	70日	模型試験終了日

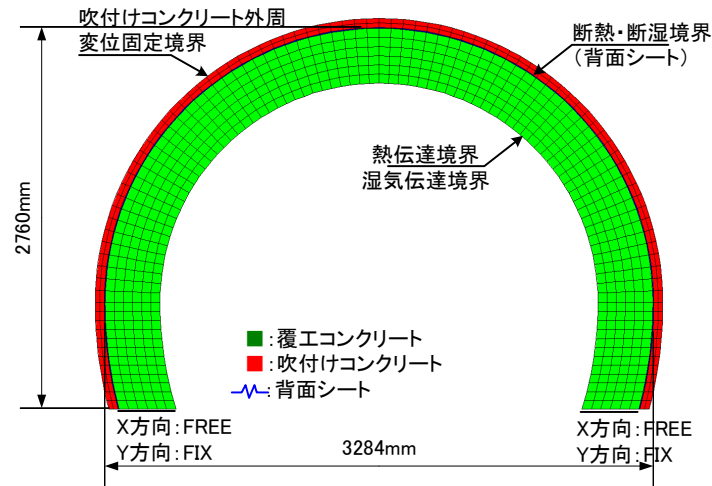


図-6.7 解析モデル

6.5.2 模型試験の解析結果

(1) 土木学会式による評価法を用いて乾燥収縮量を予測した場合 (Case I)

まず、模型試験の標準ケースについて土木学会式による評価法を用いた CaseI の材齢 70 日の予測結果を考察する。最大主応力分布および変形図を図-6.8 に、コンクリートの内部ひずみの試験値と解析値を図-6.9 に、また、コンクリート内部の応力の経時変化とコンクリートの引張強度の関係を図-6.10 に示した。

解析では、覆工コンクリート全体が一様に収縮する変形となり、コンクリートの内部ひずみは試験値よりもかなり大きい値となる。さらに全体が一様に収縮したため、コンクリート内部の応力はほぼ発生しておらず ($-0.22 \sim +0.18 \text{ N/mm}^2$)、コンクリートの引張強度 (2.46 N/mm^2) を下回る結果となった。

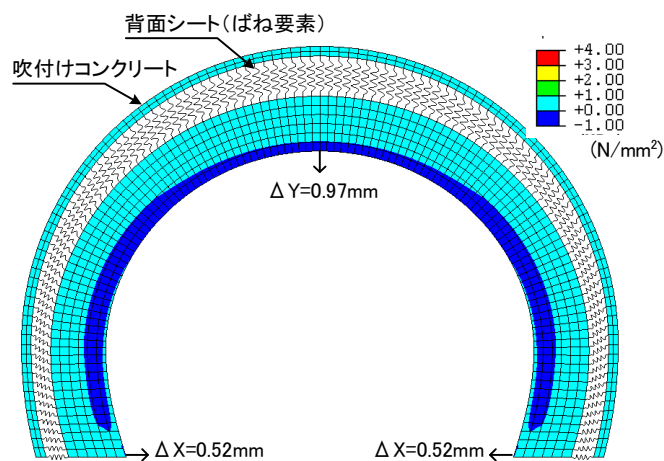


図-6.8 最大主応力分布 (解析Case I、70日)

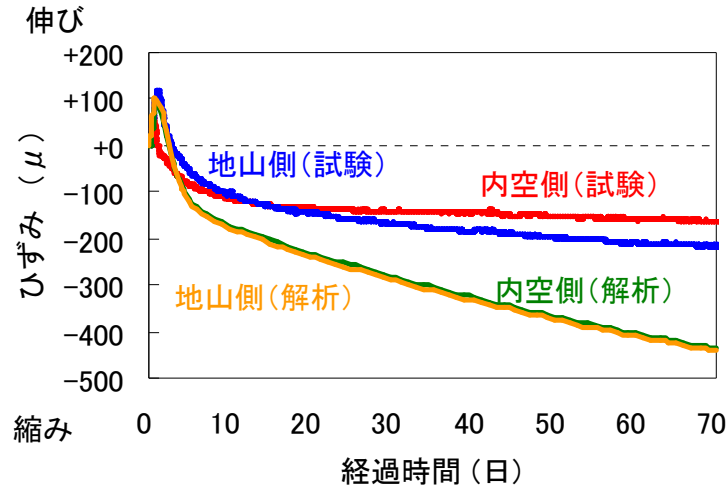


図-6.9 天端部ひずみの比較(試験Case1、解析Case I)

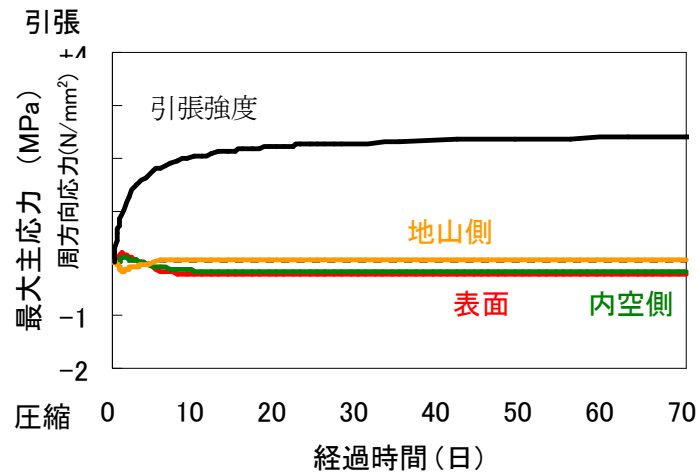


図-6.10 天端部の最大主応力の経時変化(解析Case I)

(2) 湿気移動を考慮した評価法を用いて乾燥収縮量を予測した場合(Case II、III)

次に、湿気移動を考慮した評価法による Case II の結果を考察する。Case II の最大主応力分布および変形図を図-6.11 に、天端部ひずみの試験 (Case1) と解析の比較を図-6.12 に示す。また、コンクリートの最大主応力の経時変化とコンクリートの引張応力の関係を図-6.13 に示す。

図-6.11 より、覆工コンクリート天端の鉛直変位は 0.57mm であり、Case I (0.97mm) に比較して小さい。また、図-6.12 より、コンクリート内部のひずみの経時変化は試験結果と概ね一致している。さらに、図-6.13 に示したように、コンクリート表面の応力度は材齢 23 日でその引張強度を超えることとなり、この時期にひび割れが発生することが予想される。

次に、図-6.14 に解析 Case III と試験 Case2 の覆工コンクリート天端部ひずみの比較、図-6.15 に最大主応力の経時変化を示す。図-6.12、6.14 の解析による内空側のひずみに関しては、その大きさは若干異なるものの、実験と解析で同様な発生傾向を示していると言える。これに対

して地山側は一致しているとはいえず、解析では内空側とほとんど差がない結果となっている。すなわち、図-6.5 で示したように湿気-応力連成解析を用いたにもかかわらず、内空側と地山側のひずみの差、すなわち断面内でのひずみ分布がうまく表現されていないことになる。一方、後述する現地計測の解析結果(図-6.24、6.28)では、内空側と地山側で差がある結果が得られている。このように、断面内のひずみ分布に関し異なる傾向となったのは、図-6.3 に示したような覆工コンクリートの材料物性に関するパラメータの設定によるものと考えられる。今回は、パラメータの設定においてコンクリートの透湿率 λ_p と湿気容量 $(dq/dp)_p$ は、西岡、原田の研究⁸⁾を、蒸発率 α と収縮駆動力の作用程度に関する係数 A_s については、堀部ら⁶⁾、小澤ら⁷⁾の研究を参考としたが、これらの研究でのコンクリートに対する条件等と今回の模型試験での条件が異なることが考えられる。また、解析では模型試験と現地計測で同じパラメータを用いているが、たとえば、覆工コンクリートの厚さ(現地計測に使用したトンネルでは50cm以上)の相違や背面の拘束条件、環境条件といった模型と実際のトンネルの相違も可能性として考えられる。

逆に今後、実際のトンネルという条件に即した形でコンクリートの湿気移動に関する実験等を行うことにより、適切なパラメータに関するデータの蓄積が必要であると考えられる。

次に、応力度の評価について考察する。両ケースの最大圧縮応力は地山側に発生したが、内空側には引張が発生し、最大引張応力は表面に発生した。コンクリートの材齢約26日で表面応力が引張強度(2.39N/mm^2)を超過し、ひび割れが発生する結果となった。材齢70日においては、坑内湿度60%の場合(Case II)の表面引張応力が 3.07N/mm^2 であり、坑内湿度50%の場合(Case III)の表面引張応力が 3.42N/mm^2 となっている。また、コンクリート表面の応力度は材齢26日でその引張強度を超えることとなり、この時期にひび割れが発生することが予想される。

以上より、コンクリート内部の乾燥収縮によるひずみ勾配を考慮したことにより、内空側、地山側で応力度の差が大きくなり、コンクリート表面および内空側で引張強度を超過して、表面にひび割れが発生するという事象を表現できる。また、坑内湿度が小さくなるほど、乾燥収縮ひずみ、応力は大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる。

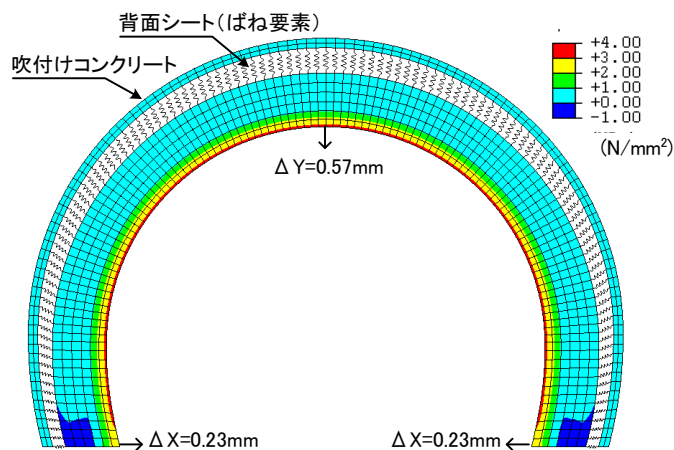


図-6.11 最大主応力分布(Case II、70日)

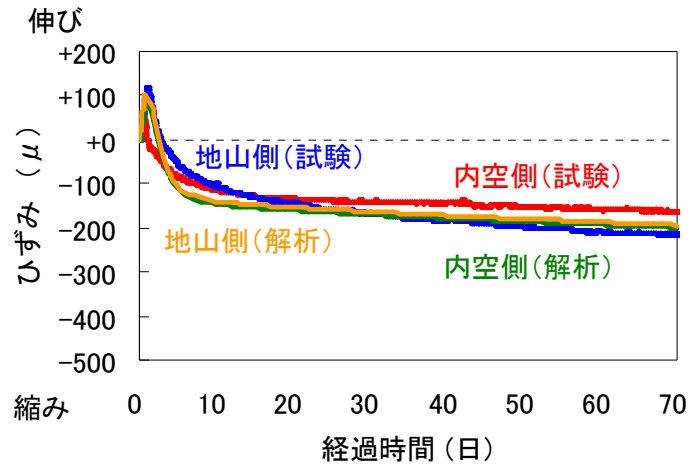


図-6.12 天端部周方向ひずみの比較(試験Case1、解析CaseⅡ)

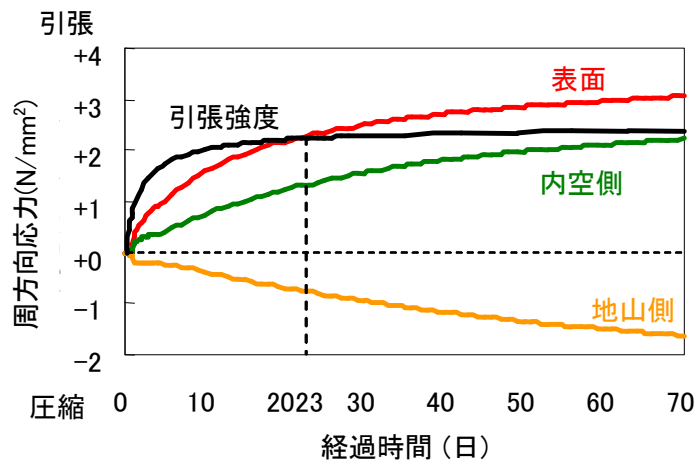


図-6.13 天端部の最大主応力の経時変化(解析CaseⅡ)

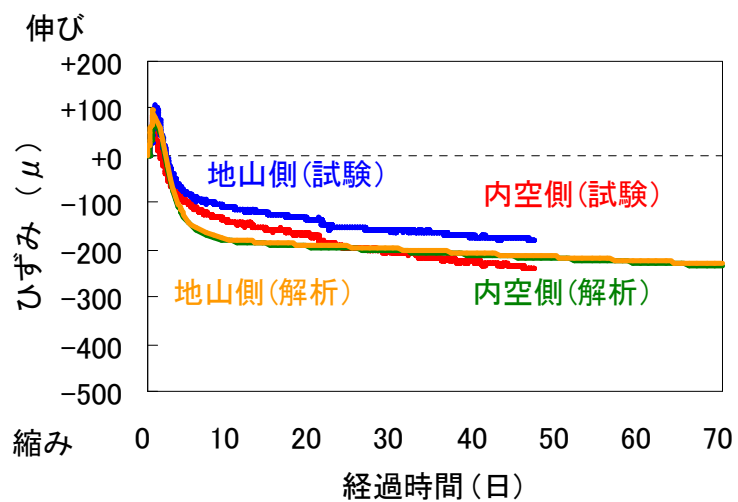


図-6.14 天端部ひずみの比較(試験Case2、解析CaseⅢ)

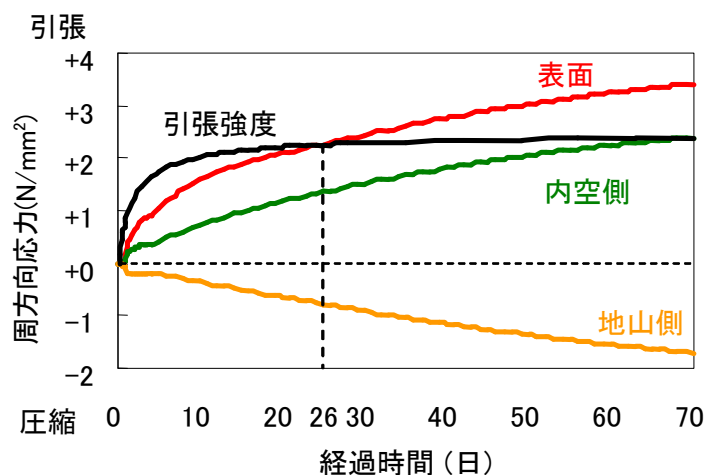


図-6.15 天端部の最大主応力の経時変化(解析CaseⅢ)

(3) 温度応力のみを考慮した場合(CaseⅣ)

図-6.16、6.17 に、熱-応力連成解析を用いた場合の天端部ひずみ、最大主応力の経時変化を示す。図-6.16 より、4.3 節で示した模型試験の標準ケース(Case1、解析 CaseⅣ)では、打設温度は 15℃であったが、水和熱により最大約 40℃まで上昇した。その際、天端部では約 100 μ の膨張ひずみが発生した。それ以降では、内空側の放熱(熱伝達)により温度が低下し、打設後約 10 日で試験室内温度 20℃に収束した。今回の解析により、放熱による温度収縮ひずみの収束値は約 120 μ であった。

一方、解析では温度応力のみを考慮していることから試験結果と解析結果の差が乾燥収縮により発生する内部ひずみであり、時間経過とともに温度収縮ひずみより乾燥収縮ひずみが卓越している。また、図-6.17 に示した最大主応力の解析結果によれば、温度応力のみでは引張応力を超過しない。従って、ひび割れの発生の主な要因は、乾燥収縮であることが分かる。

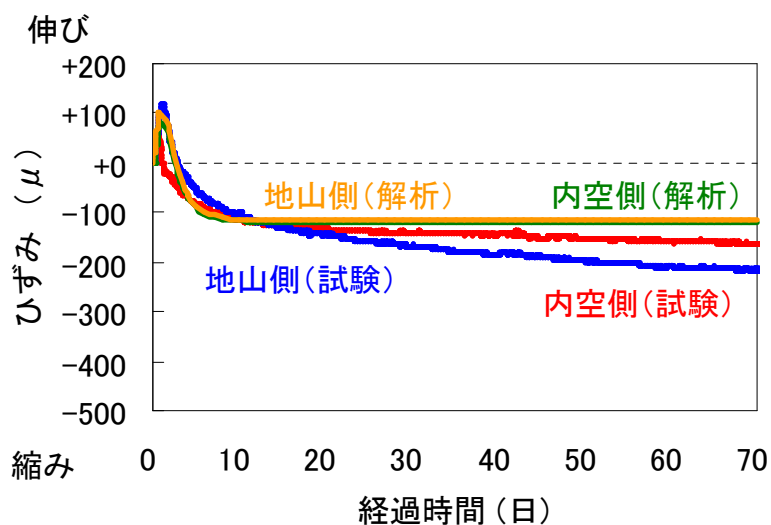


図-6.16 天端部ひずみの比較(試験Case1、解析CaseⅣ)

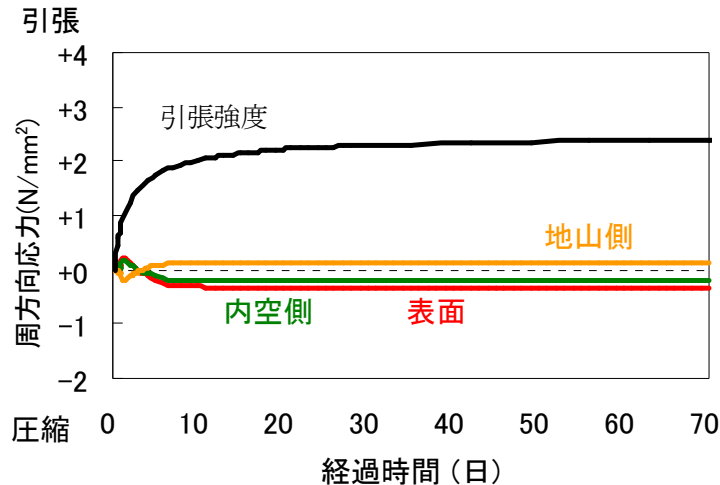


図-6.17 天端部の最大主応力の経時変化(解析CaseⅣ)

(4) 覆工コンクリート背面を完全に拘束した場合(CaseⅤ)

ここでは、外部拘束がある場合(背面シートを使用しない場合)についても解析を行った。なお、この解析ケースでは温度膨張、収縮のみを考慮した。

天端部ひずみの比較および最大主応力の変化を図-6.18、6.19 に示す。この場合、覆工コンクリートは背面で拘束されているので、ひずみの発生はほとんどないものの、全断面に引張強度を超えた $2.67 \sim 2.96 \text{ N/mm}^2$ の引張応力が発生する結果となった。さらに、コンクリートの引張強度を上回るのは材齢 4 日程度であると考えられ、早期にひび割れが発生することとなる。この結果から、背面シートがない場合には、温度応力のみでひび割れが発生する。

また、覆工コンクリート天端の断面内の周方向応力分布の比較を図-6.20 に示す。図-6.20 より、土木学会式により乾燥収縮量を予測した場合(解析 CaseⅠ)の応力は、温度収縮のみを考慮した場合(解析 CaseⅣ)とほぼ同じで 0 に近い応力値を示した。断面内で一様な乾燥収縮を考慮した場合は、乾燥収縮応力がほとんど発生しない。また、覆工コンクリート背面が拘束された場合(解析 CaseⅤ)には、全断面で約 3 N/mm^2 の周方向の引張応力が発生し、内空側から地山側にかけて貫通するひび割れが発生する。

一方、背面シートがあり、湿気移動を考慮した評価法を用いた場合(解析CaseⅠ、Ⅱ)の最大主応力は、表面でその引張応力が最も大きく ($3 \sim 3.5 \text{ N/mm}^2$)、表面からコンクリート内部に入るに従って減少し、約50mmの深さでコンクリートの引張強度を下回った。このことから、両ケースの天端部に発生したひび割れの深さは50mm程度であると算定される。

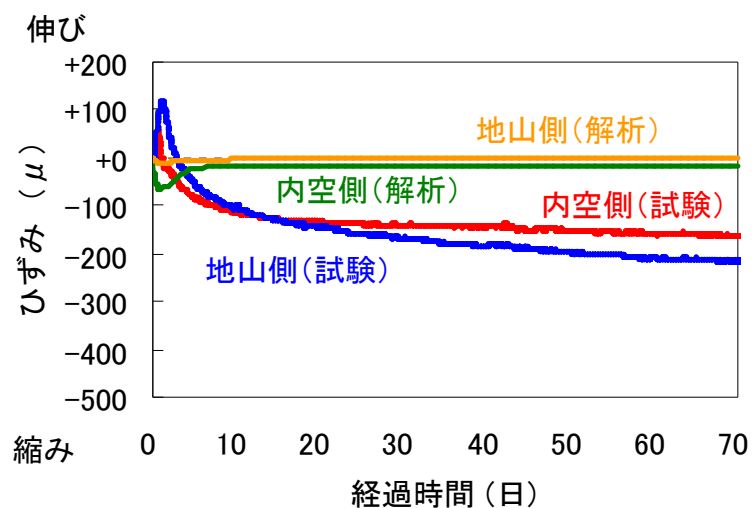


図-6.18 天端部ひずみの比較(試験Case1、解析Case V)

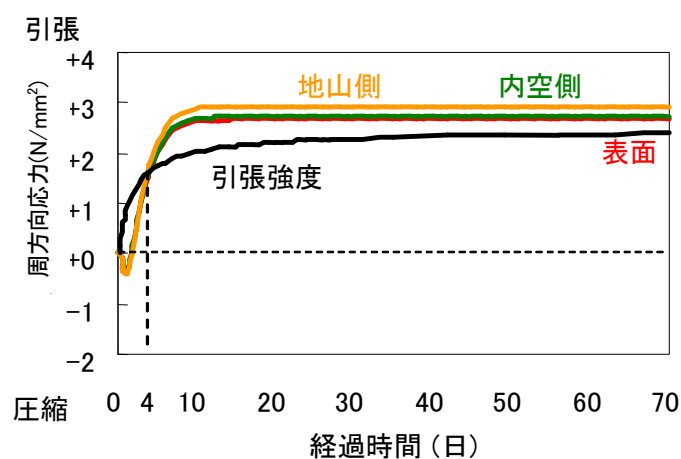


図-6.19 天端部の最大主応力の経時変化(解析Case V)

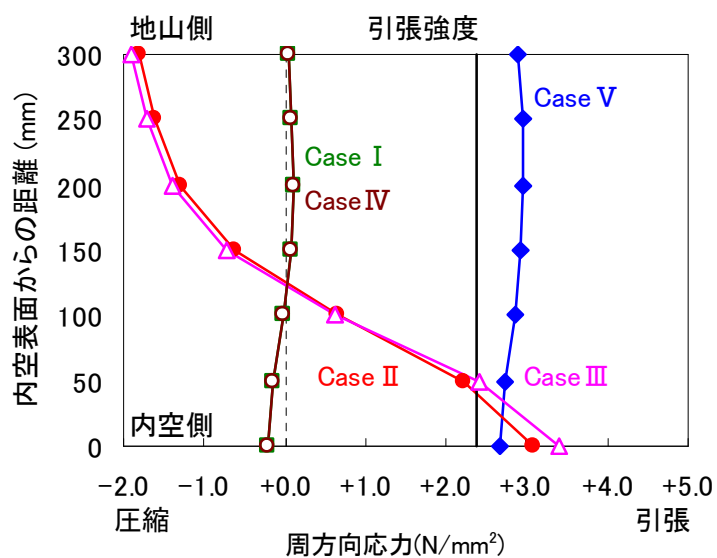


図-6.20 天端部の周方向応力の断面内分布の比較

6.5.3 模型試験の解析結果のまとめ

ここでは、覆工コンクリートのひび割れ発生に関し、従来の水和熱、温度による影響に加えて、乾燥収縮による影響を表現する方法として、「湿気移動を考慮した評価法」を提案した。また、第4章の模型試験の結果との比較を行った。さらに、表-6.5で示した解析ケースを実施、比較することで以下の知見を得た。

- (1) 湿気移動を考慮した評価法は、これまで一般に用いられてきた土木学会式による評価法に比べて、精度よく模型試験の結果を再現できる。
- (2) 坑内湿度を低下させた場合（解析CaseⅡ、Ⅲ）の結果の比較から、湿度を低下させた場合にコンクリート内部の収縮ひずみ、応力は大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる。
- (3) 温度応力のみを考慮した場合（解析CaseⅣ）の結果から、覆工コンクリート内部に発生する収縮ひずみは、乾燥収縮が支配的である。
- (4) 覆工コンクリート背面を完全に拘束した場合(CaseⅤ)の結果から、覆工コンクリートの地山側に背面シートを施工することで、コンクリートの収縮時の拘束を緩和し、水和熱による温度収縮ひび割れの発生を抑制できる。

6.6 「湿気移動を考慮した評価法」の現地計測への適用の検証

本節では、第5章で実施した現地計測によって得られたひび割れの発生状況について、湿気移動を考慮した評価法を用いて解析し、その再現性について検証する。

6.6.1 解析モデル、条件

図-6.21 に解析モデル、表-6.8 に各解析断面に用いた入力値を示す。覆工コンクリート、吹付けコンクリートおよび地山は平面ひずみ要素で、背面シートは、引張力を負担しない法線方向のばね要素とした。また、背面シートによる接線方向の拘束はないものと仮定した。その他の条件、材料物性値、養生条件、環境条件については、現地計測の記録に基づいて設定した。

解析ステップは表-6.9 に示すとおりであり、コンクリートの凝結開始時間は、打設完了 8.5 時間後（コンクリートの凝結時間試験法(JIS A 1147)による）とした。

また、この解析では、覆工コンクリートの天端部に着目したため温度、湿度については、後述する図-6.22、6.26 に示した天端部付近の坑内温度、湿度を入力値とした。

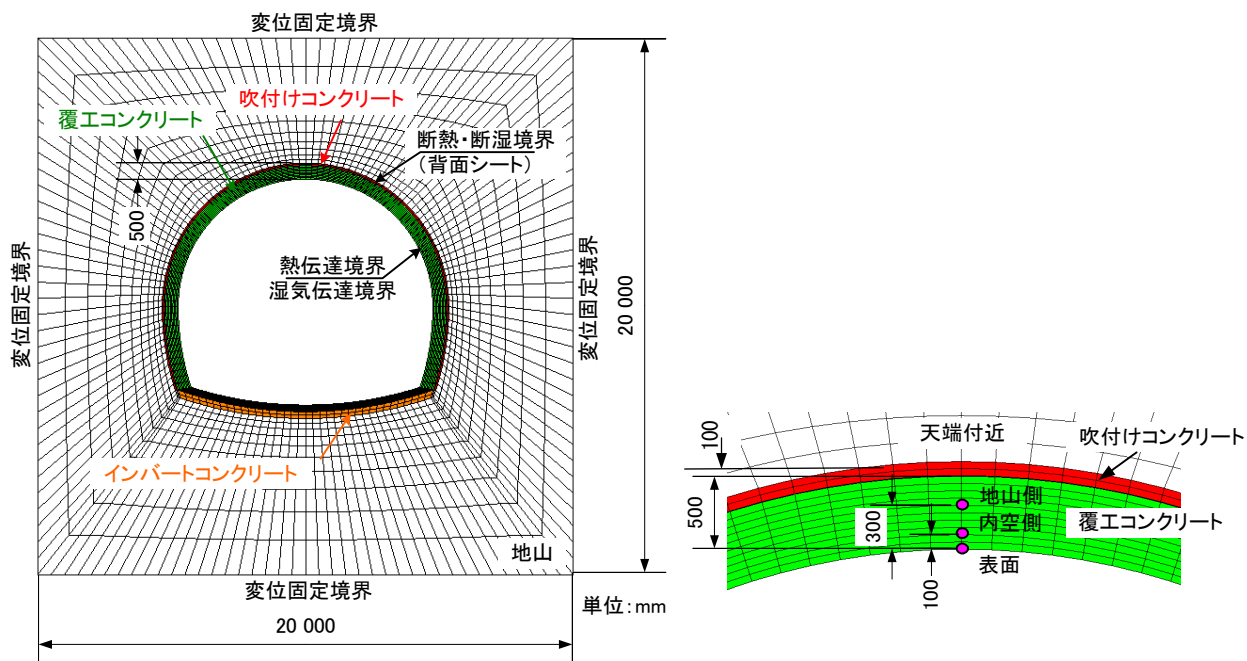


図-6.21 解析モデル

表-6.8 現地計測の解析に用いた材料特性、養生、環境条件

項目	記号	単位	解析対象断面	
			夏期断面	冬期断面
●覆工コンクリート				
セメントの種類	-	-	普通ポルトランドセメント	
単位セメント量	C	kg/m ³	280	278
単位水量	W	kg/m ³	147	162
水セメント比	W/C	%	53	58
密度	ρ_c	kg/m ³	2250	
28日強度	$f'_c(28)$	N/mm ²	27.3	27.3
圧縮強度	$f'_c(t)$	N/mm ²	$f'_c(t)=t/(4.50+0.95t) \cdot 1.1 \cdot f'_c(28)$	
引張強度	$f_{tk}(t)$	N/mm ²	$f_{tk}(t)=0.44 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	
ヤング係数	$E_e(t)$	kN/mm ²	$E_e(t)=4.7 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	
ポアソン比	ν	-	0.2	
線膨張係数	α	/℃	10×10^{-6}	
比熱	C_c	kJ/kg.℃	1.15	
熱伝導率	λ_c	W/m.℃	2.7	
打設温度	-	℃	29	11
断熱温度上昇特性	$Q(t)$	℃	$42.80(1-e^{-2.50t})$	$44.36(1-e^{-1.00t})$
厚さ	tc	mm	500	500
透湿率	λ_p	ng/m ² ・s・Pa	41.8～167.1	
湿気容量	$(dq/dP)_P$	g/m ³ ・Pa	18.8～136.8	
蒸発率	α	μg/m ² ・s・Pa	0.6～4.2	
収縮駆動力係数	A_s	-	0.14～0.50	
●養生条件				
型枠	-	-	メタルフォーム	
脱型時間	-	時間	15	15
熱伝達率(内空側)	η	W/m ² ・℃	12	14
●環境条件				
平均坑内温度100日間	T	℃	21	19
平均坑内湿度100日間	RH	%	80	40
●背面シート				
種類・材料	-	-	アイソレーションシート	防水シート
厚さ	t	mm	1.0	3.8
圧縮ばね定数(単位面積あたり)	k_c	MN/m ³	5	20
引張ばね定数(単位面積あたり)	k_t	MN/m ³	0	0
●吹付けコンクリート				
密度	ρ_c	kg/m ³	2150	
ヤング係数	E_m	kN/mm ²	22	
ポアソン比	ν	-	0.2	
●地山				
地山等級 (NATM)	-	-	IV _N ～V _N	
密度	ρ_c	kg/m ³	2000	
変形係数	E_m	kN/mm ²	50	
ポアソン比	ν	-	0.3	

表-6.9 解析ステップ

解析ステップ	時間	備 考
①打設完了	0.0時間	
②凝結開始	8.5時間	覆工コンクリート応力の発生
③脱型	15時間	覆工コンクリート自重の作用
④乾燥収縮開始	15時間	
⑤解析終了	100日	

6.6.2 解析結果

夏期施工における天端部付近の坑内温度、坑内湿度の経時変化を図-6.22に示す。また、覆工コンクリートの内部温度、ひずみの計測値と解析結果の比較を図-6.23、6.24に示す。さらに、解析による覆工コンクリート天端部の最大主応力(周方向)の変化を図-6.25に示す。同様に、冬期施工について天端部付近の坑内温度、坑内湿度の経時変化を図-6.26、覆工コンクリートの内部温度、ひずみの計測値と解析結果の比較を図-6.27、6.28に、解析による覆工コンクリート天端部の最大主応力(周方向)の変化を図-6.29に示す。

夏期施工、冬期施工ともに、図-6.23、6.27より、解析によるコンクリート内部の温度変化は計測値とほぼ一致している。また、図-6.24、6.28より、コンクリートの内部ひずみに関し、内空側のひずみについては、計測値と解析結果はほぼ一致している。しかしながら、地山側のひずみに関しては、計測値より30～100 μ 程度小さい解析結果となった。この要因としては、当該の覆工コンクリートに対して、隣接する既設の覆工コンクリートによる三次元的な拘束状態が二次元解析では考慮されず、覆工コンクリートの自重による天端部での曲げ挙動が実際の状態よりも大きく計算されたためと考えられる。

次に、図-6.25、6.29に示した覆工コンクリートの表面、内部の応力度については、夏期施工、冬期施工ともに、表面の応力度はコンクリートの引張強度を超過するため、ひび割れが発生することを示している。ただし、地山側の応力度は圧縮応力となっており、ひび割れは背面まで貫通するものでないと言える。これは、現地計測の結果と一致している。

ひび割れの発生時期に関して、夏期施工においては、坑内湿度が80%から45%まで急激に低下した材齢80日前後(図-6.22)において、覆工コンクリート表面の引張応力度が急激に大きくなり、ひび割れが発生するに至ったものと思われる。一方、冬期施工においては、打設から材齢20日頃までに坑内温度、坑内湿度ともに急激に低くなり(図-6.26)、この時期に覆工コンクリート表面の引張応力度が引張強度を超過し、ひび割れが発生しているものと思われる。これらのひび割れの発生時期については、観測記録による現地計測でのひび割れ発生の推定時期に概ね一致している。

また、夏期施工、冬期施工における天端部、肩部、SL部の覆工コンクリート表面の応力度の解析結果を図-6.30、6.31に示す。この結果により、天端部表面に発生した引張応力は他の部位と比較して、最も早く大きくなる傾向があり、覆工コンクリートの部位の中でも、最初にひび割れが発生する箇所になると考えられる。

さらに、図-6.32に夏期施工、冬期施工それぞれの解析終了時点(打設後100日)での覆工コンクリート天端部の施工内の応力度分布を示す。これより、天端部に発生したひび割れの深さは、夏期では約80mm、冬期では約100mmと算定される。一方、第5章で示した現地計測でのひび割れ深さは、表-5.3より夏期で20mm～135mmで平均72mm、表-5.4より冬期では30mm～430mmで平均166mmとなっており、冬期の方が夏期に比べて誤差は大きいものの、計測結果とよく一致しており、ひび割れ深さの予測は本解析手法により推定可能であると言える。

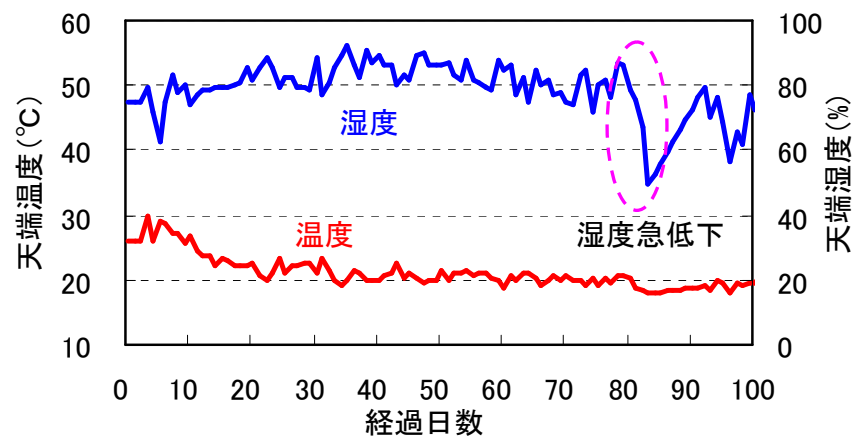


図-6.22 天端付近の坑内温度・湿度の変化(夏期)

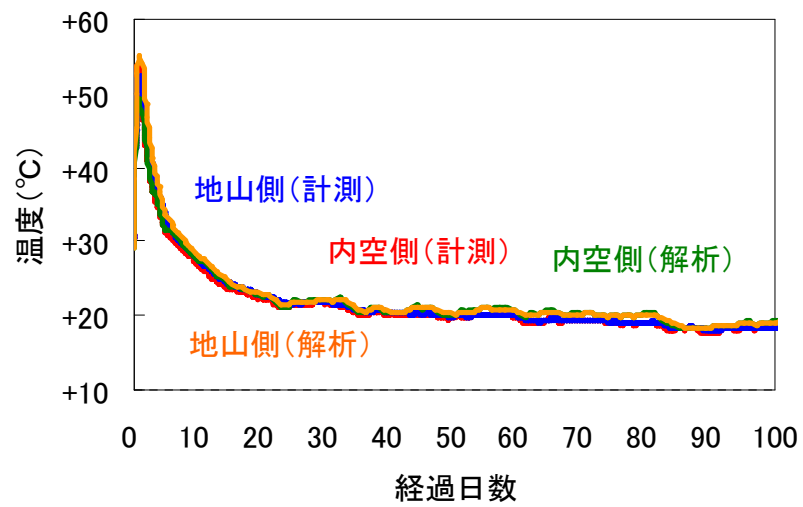


図-6.23 天端部の内部温度の比較(夏期)

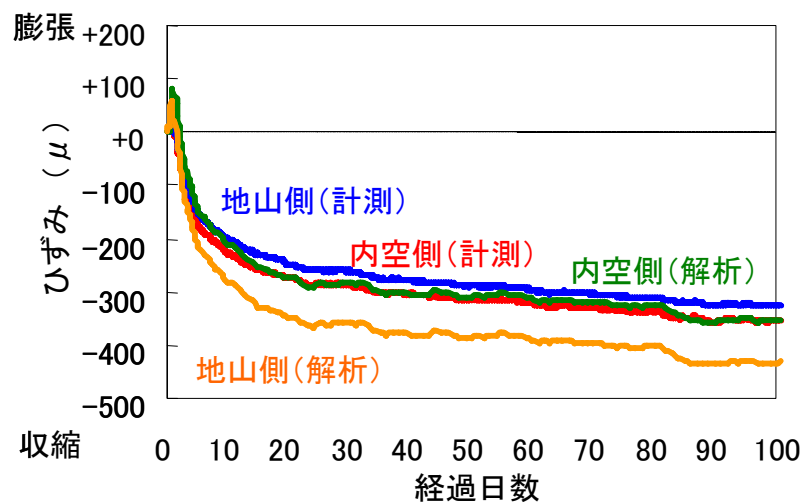


図-6.24 天端部の内部ひずみの比較(夏期)

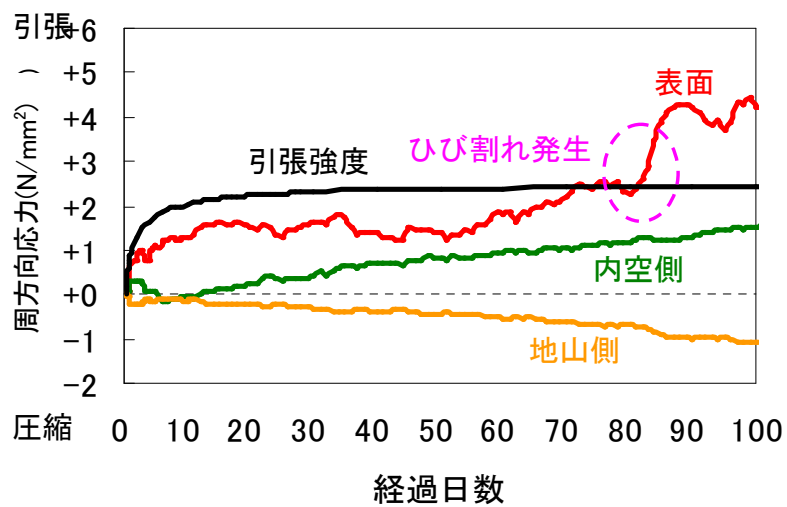


図-6.25 天端部の最大主応力の解析結果(夏期)

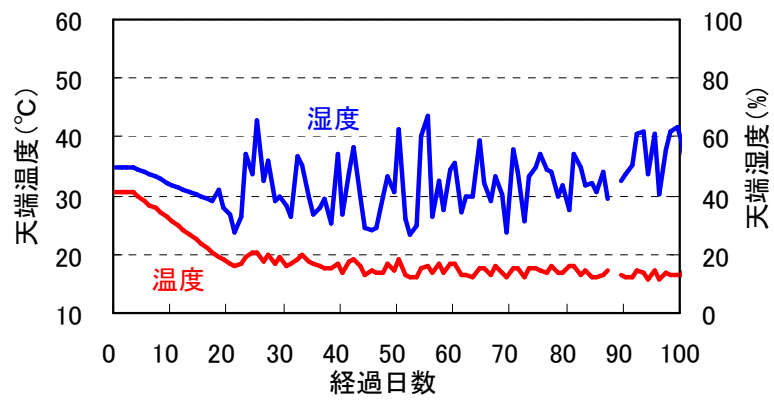


図-6. 26 天端付近の坑内温度・湿度の変化(冬期)

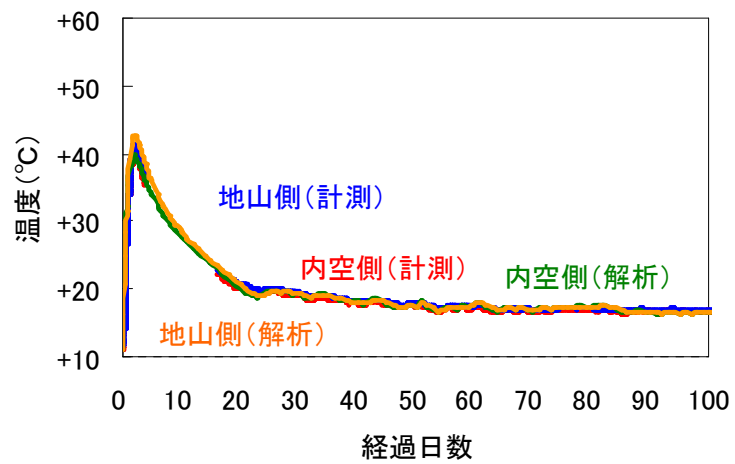


図-6. 27 天端部の内部温度の比較(冬期)

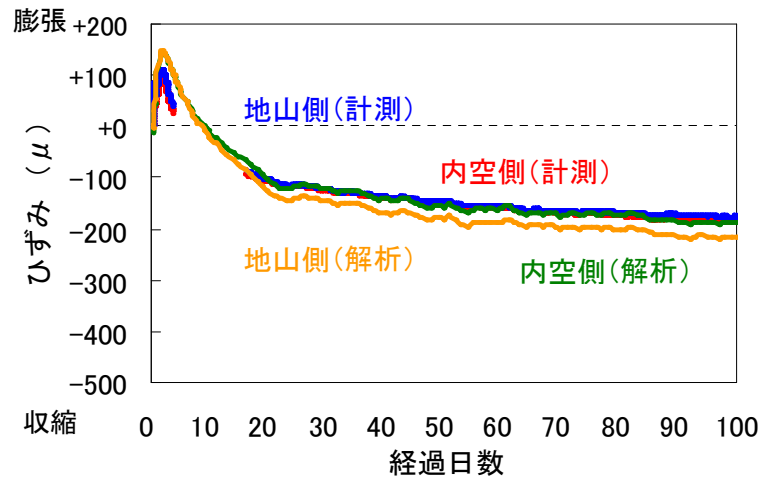


図-6. 28 天端部の内部ひずみの比較(冬期)

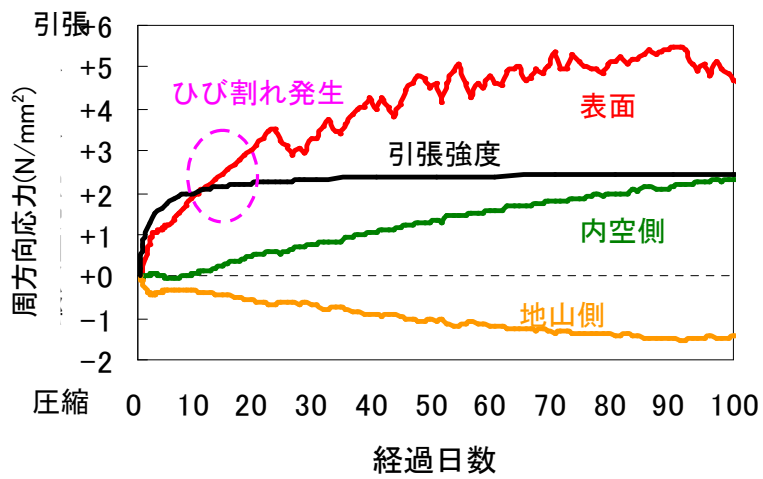


図-6. 29 天端部の最大主応力の解析結果(冬期)

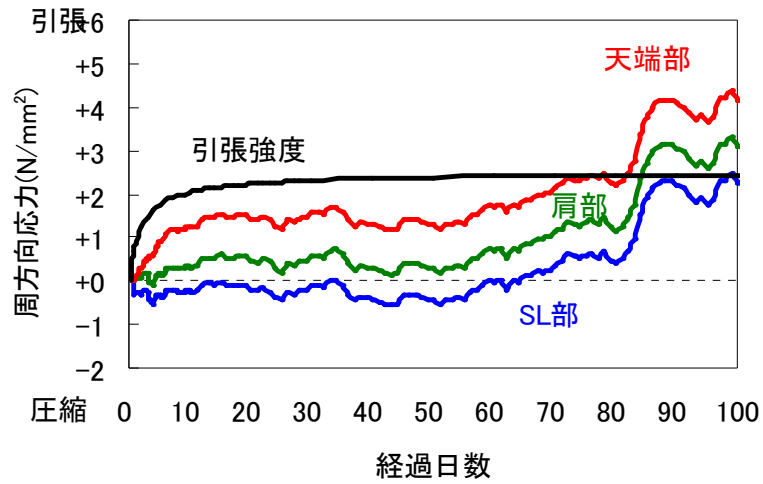


図-6.30 覆工コンクリート表面の周方向応力度の比較(夏期)

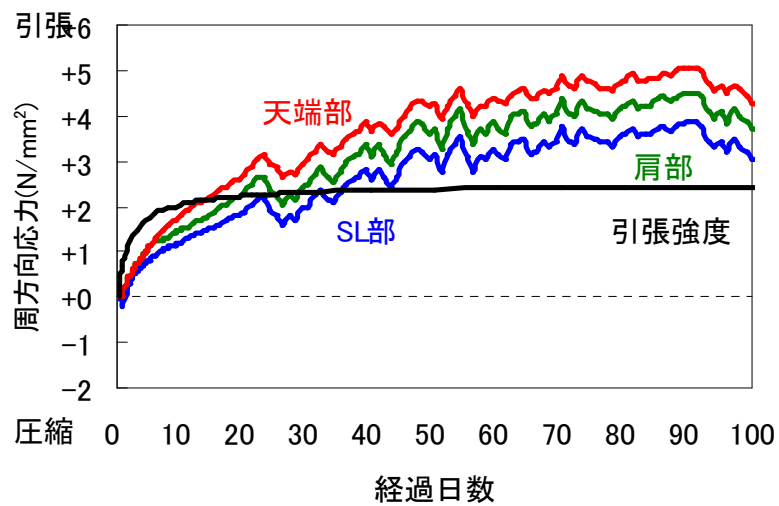


図-6.31 覆工コンクリート表面の周方向応力度の比較(冬期)

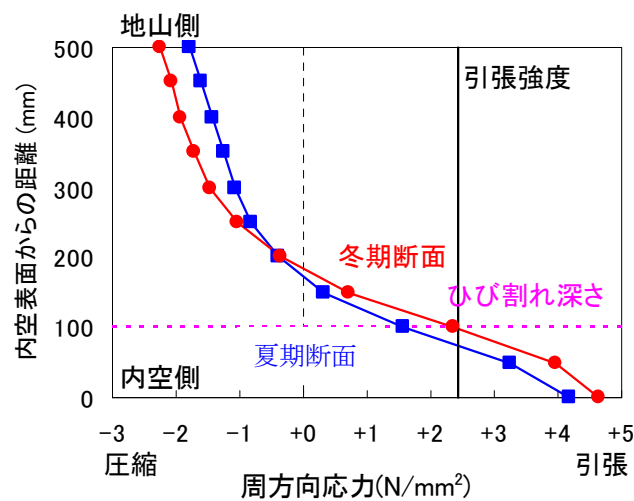


図-6.32 天端部の最大主応力分布の比較

6.6.3 「湿気移動を考慮した評価法」の現地計測への適用の検証のまとめ

本節では、第5章の現地計測の結果に、「湿気移動を考慮した評価法」を適用し、その解析手法の検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 湿気移動を考慮した評価法を用いて覆工コンクリート内部ひずみの算定し、計測値と比較を行ったところ、ほぼ一致している結果を得られた。また、周方向の最大主応力を求め、引張強度と比較することでひび割れ発生時期を導き、計測結果と比較したところ、再現可能である結果を得られた。このことから湿気移動を考慮した評価法は、実トンネルにおいても内部ひずみおよびひび割れの発生を再現できる。
- (2) ひび割れ発生時期について、夏期施工では、坑内湿度が急激に低下した材齢80日前後、冬期施工では坑内湿度が急激に低下した打設から材齢20日頃に覆工コンクリート表面の引張応力が急速に増加し、引張強度を超過している。このことから、ひび割れの発生時期はトンネル坑内の湿度が急激に低下した時期であり、坑内湿度がひび割れ発生に影響していることが考えられる。
- (3) 湿気移動を考慮した評価法を用いて、ひび割れ深さについて計測結果と解析による値の比較を行ったところ、冬期施工で約70mmの誤差があったものの、夏期施工ではほぼ一致している結果となった。このことから湿気移動を考慮した評価法を用いることで推定可能な範囲で再現できる。

6.7 パラメータスタディによるひび割れ発生要因の分析

ここでは、覆工コンクリート内空側の乾燥・放熱に関するパラメータと考えられる、

- (1) 坑内湿度
- (2) 脱型時間
- (3) 坑内温度
- (4) 打設温度
- (5) 単位水量

を選定し、これらが覆工コンクリートのひび割れに与える影響について確認することを目的として、湿気移動を考慮した評価法を用いて解析を行った。

また、解析モデルは6.6節の冬期施工で用いたものとし、解析の入力値は表-6.10に示すものとした。なお、トンネル坑内の温度、湿度条件が非定常であり、時間経過に伴って、覆工コンクリートの応力がどのように変化するかを検討するため、期間を約1年(360日)とした。

表-6.10 パラメータスタディに用いた材料特性、養生、環境条件

項 目	記号	単位	解析対象断面 冬期断面
●覆工コンクリート			
セメント種類	-	-	普通ポルトランドセメント
単位セメント量	C	kg/m ³	280
単位水量	W	kg/m ³	130,140,150,160,170,000
水セメント比	W/C	%	46478625057203600
密度	ρ_c	kg/m ³	2250
28日強度	$f'_c(28)$	MPa	18
圧縮強度	$f'_c(t)$	MPa	$f'_c(t)=\{t/(4.50+0.95t)\} \cdot 1.1 \cdot f'_c(28)$
引張強度	$f_{tk}(t)$	MPa	$f_{tk}(t)=0.44 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$
ヤング係数	$E_e(t)$	GPa	$E_e(t)=4.7 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$
ポアソン比	ν	-	0.2
線膨張係数	α	/°C	10×10^{-6}
比熱	C_e	kJ/kg·°C	1.15
熱伝導率	λ_e	W/m·°C	2.7
打設温度	-	°C	10, 15, 20, 25, 30, 35
断熱温度上昇特性	$Q(t)$	°C	$42.80(1-e^{-1.00t}) \sim 44.60(1-e^{-1.00t})$
厚さ	tc	mm	500
透湿率	λ_p	ng/m·s·Pa	41.8~167.1
湿気容量	$(dq/dP)_p$	g/m ³ ·Pa	18.8~136.8
蒸発率	α	μ g/m ² ·s·Pa	0.6~4.2
収縮駆動力係数	A_s	-	0.14~0.50
●養生条件			
養生方法	-	-	メタルフォーム
養生時間			15時間, 3日, 7日, 14日
熱伝達率 (内空側)	η	W/m ² ·°C	14
●環境条件			
坑内温度	T	°C	10, 15, 20, 25, 30, 35
坑内湿度	RH	%	40, 50, 60, 70, 80, 90
●その他			
背面シートの物性値			表-6.8 現地計測の解析における冬期断面の解析入力値と同様
吹付けコンクリートの物性値			
地山の物性値			

: パラメータ

以下に、各パラメータに関する結果の整理と考察を示す。

6.7.1 坑内湿度の影響

坑内湿度が高い場合には、コンクリートの乾燥によるひび割れへの影響が低減されるものと想定される。

図-6.33にコンクリート打設後約1年での坑内湿度と覆工コンクリートの天端周方向応力の関係を示す。なお、解析では坑内湿度を40%から90%まで変化させた。

図-6.33より、乾燥収縮による引張応力は坑内湿度が上昇するに伴い大きく減少し、坑内湿度90%では発生する引張応力がコンクリートの引張強度を下回ることから、ひび割れが発生しないものと考えられる。従って、坑内湿度は内空側の放熱・乾燥によるひび割れ発生抑制に大きく影響すると言える。

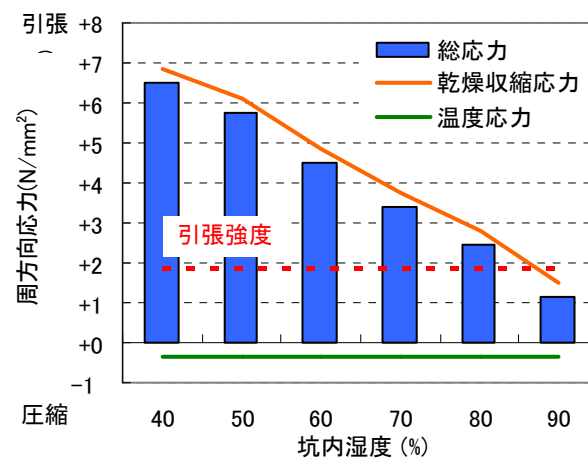


図-6.33 坑内湿度と天端部周方向応力の関係

6.7.2 脱型時間の影響

覆工コンクリートの脱型時間を長くした場合には乾燥収縮の開始時間が遅くなることが想定される。

図-6.34にコンクリート打設後約1年での脱型時間と覆工コンクリートの天端周方向応力の関係を示す。解析では脱型時間を15時間から14日まで変化させた。なお、解析では、脱型までの時間の経過に伴いコンクリートの圧縮強度が増加することを考慮している。

図-6.34より、乾燥収縮によって発生する引張応力は脱型時間を長くすると大きくなることが分かる。ただし、いずれの結果もコンクリートの引張強度を超過しており、脱型時間は内空側の放熱・乾燥によるひび割れ発生に影響しないと言える。

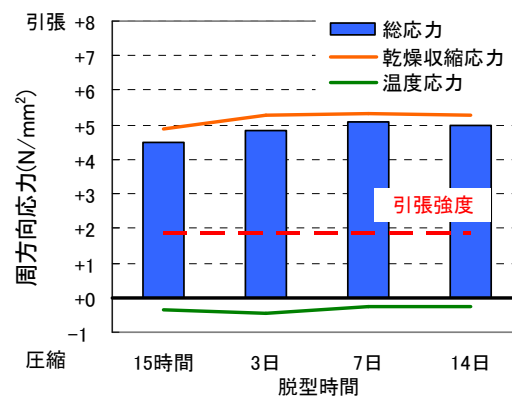


図-6.34 脱型時間と天端部周方向応力の関係

6.7.3 打設温度の影響

覆工コンクリートの打設温度がトンネル坑内の温度に近い場合には、放熱が減少することが想定される。

図-6.35 にコンクリート打設後約 1 年での打設温度と覆工コンクリートの天端周方向応力の関係を示す。なお、解析では打設温度を 10℃から 30℃まで変化させた。

図-6.35 より、打設温度を変化させても温度応力、乾燥収縮による発生応力のいずれも大きな変化はなく、さらに、コンクリートの引張強度を超過する結果となった。従って、覆工コンクリートの打設温度は、内空側の放熱・乾燥によるひび割れ発生に影響しないと言える。

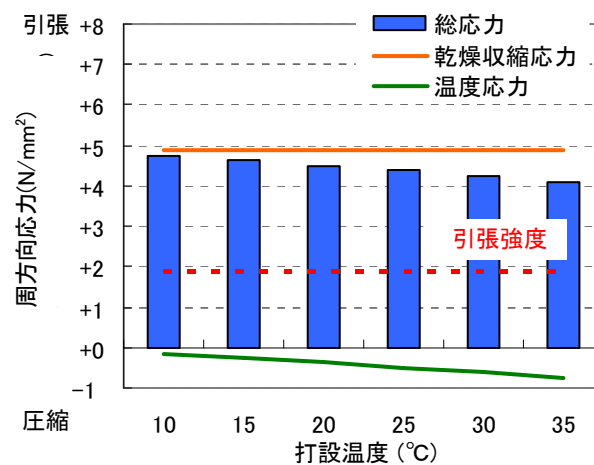


図-6.35 打設温度と天端部周方向応力の関係

6.7.4 坑内温度の影響

坑内温度が高い場合には、放熱によるひび割れへの影響が低減されることが想定される。

図-6.36に、コンクリート打設後約1年での坑内温度と覆工コンクリートの天端周方向応力の関係を示す。なお、解析では坑内温度を10℃から35℃まで変化させた。

図-6.36より、温度応力に起因するコンクリートの圧縮応力は、坑内温度が上昇するに従って減少している。しかしながら、坑内温度を変化させても、コンクリートの引張強度を超過していることから、坑内温度は内空側の放熱・乾燥によるひび割れ発生に影響しないと言える。

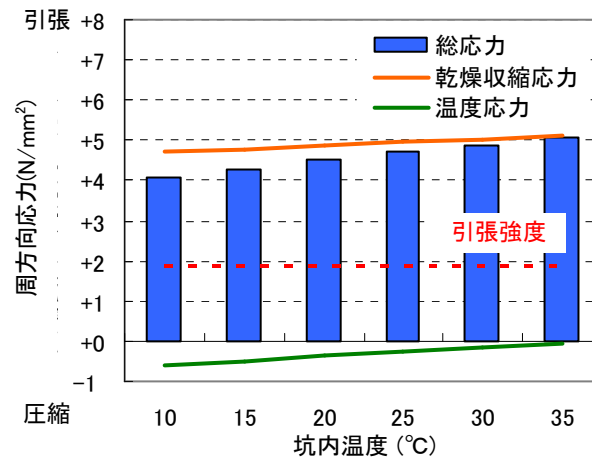


図-6.36 坑内温度と天端部周方向応力の関係

6.7.5 単位水量の影響

コンクリートの単位水量に関し、それが多くなると乾燥収縮量が増加し、乾燥収縮による応力が増加することが想定される。

図-6.37に、コンクリート打設後約1年での単位水量と覆工コンクリートの天端周方向応力の関係を示す。なお、解析では単位水量を130kg/m³から180 kg/m³まで変化させた。

図-6.37より、単位水量が多くなるほど、乾燥収縮による引張応力が大きくなることが分かる。しかしながら、脱型時間や打設温度の場合と同様に、いずれもコンクリートの引張強度を超過する結果になっている。従って、単位水量は、内空側の放熱・乾燥によるひび割れ発生に影響しないと言える。

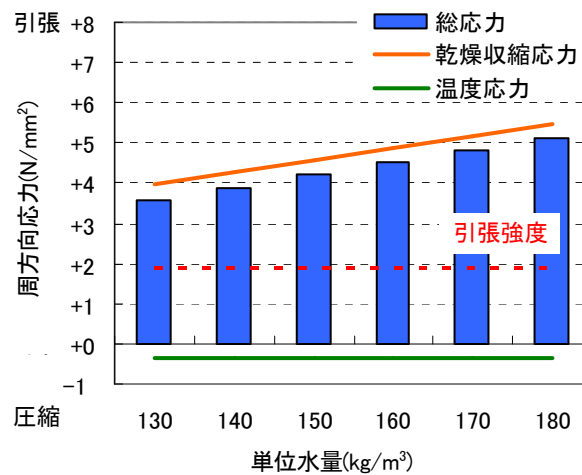


図-6.37 単位水量と天端部周方向応力の関係

6.8 まとめ

これまでの覆工コンクリートのひび割れを対象とした数値解析では、乾燥収縮の予測方法に土木学会の「2007 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕」により提案されているコンクリートの乾燥収縮ひずみ式⁴⁾を用いるのが一般的であった。この方法では、コンクリートの断面内でのひずみ分布を一様であると仮定している。これに対して、トンネルに用いられる覆工コンクリートでは、背面は地山でトンネル内空側は空気にさらされており、コンクリートの硬化過程での水和熱の発生、放熱や乾燥に関しては、その断面内で一様ではないと考えられる。

そこで、本章では、コンクリートの断面内での乾燥収縮に関する不均一性を考慮する方法として、「湿気移動を考慮した評価法」を提案し、第4章および第5章の結果を元に、適用の妥当性の検討を行った。

第4章の模型試験結果との比較、検討において以下の成果が得られた。

- (1) 湿気移動を考慮した評価法は、これまで一般に用いられてきた土木学会式による評価法に比べて、精度よく模型試験の結果を再現できる。
- (2) トンネル内空側の環境条件で湿度を低下させた場合には、コンクリート内部の収縮ひずみ、応力は大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる。
- (3) 覆工コンクリート内部に発生する収縮ひずみは、乾燥収縮が支配的である。

次に、第5章の現地計測結果に対して、湿気移動を考慮した評価法の適用を試みた結果、以下の成果が得られた。

- (1) 湿気移動を考慮した評価法を用いて覆工コンクリート内部ひずみの算定し、計測値と比較を行ったところ、ほぼ一致している結果を得られた。また、周方向の最大主応力を求め、引張強度と比較することでひび割れ発生時期を導き、計測結果と比較したところ、再現可能である結果を得られた。このことから湿気移動を考慮した評価法は、実トンネルにおいても内部ひずみおよびひび割れの発生を再現できる。
- (2) ひび割れ発生時期について、夏期施工では、坑内湿度が急激に低下した材齢80日前後、冬期施工では坑内湿度が急激に低下した打設から材齢20日頃に覆工コンクリート表面の引張応力が急速に増加し、引張強度を超過している。このことから、ひび割れの発生時期はトンネル坑内の湿度が急激に低下した時期であり、坑内湿度がひび割れ発生に影響していることが考えられる。
- (3) 湿気移動を考慮した評価法を用いて、ひび割れ深さについて計測結果と解析による値の比較を行ったところ、冬期施工で約70mmの誤差があったものの、夏期施工ではほぼ一致している結果となった。このことから湿気移動を考慮した評価法を用いることで推定可能な範囲で再現できる。

さらに、現地計測のうちの冬期断面の解析をモデルとして、覆工コンクリートの施工環境、である坑内湿度、脱型時間、打設温度、坑内温度とコンクリートの品質に影響を与える単位水量を変化させた場合のひび割れ発生に関するパラメータスタディを実施した。その結果、覆工

コンクリートのひび割れ発生の程度に最も大きく影響する要因は、坑内湿度であることが明らかとなった。

以上の結果より、覆工コンクリートの初期性状に関して、ひび割れは乾燥収縮に起因し、覆工コンクリート内の湿気移動に伴う地山側、内空側のひずみ差により発生するというひび割れの発生メカニズムが明らかにできた。また、ひび割れ発生を抑制するためには、坑内湿度をできるだけ高く維持することが有効な対策になることが分かった。

参考文献

- 1) 馬場弘二, 伊藤哲男, 佐野信夫, 谷口裕史, 杉山律, 福留和人「覆工コンクリート模擬モデルによるひび割れ抑制対策比較試験」土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 2, PP. 285-295, 2006. 4
- 2) 服部鋭啓, 入矢桂史郎:「トンネル2次覆工コンクリートのひび割れに関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23, No. 2, PP. 1129-1134, 2001
- 3) 満尾淳, 片瀬貴文:「NATM2次覆工の温度応力解析」、トンネルと地下、第16巻11号, 1985, PP. 33-40.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), PP. 45-47, 2007
- 5) 籠橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, PP. 685-690, 2001.
- 6) 堀部謙, 森川友博, 中村恭香, 森本博昭: コンクリート中の水分移動解析手法について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, PP. 603-608, 2004.
- 7) 小澤満津雄, 中村恭香, 永井拓太, 森本博昭: コンクリートの乾燥収縮モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, PP. 533-538, 2006.
- 8) 西岡栄香, 原田有: コンクリートの透質率および湿気拡散について, セメント技術報告, XV, PP. 274-278, 1961.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), PP. 340-343, 2007

第7章 初期ひび割れ抑制方法の提案

7.1 概説

本章では、これまでの試験・計測結果および解析結果を踏まえて、初期ひび割れを抑制する対策を提案する。第6章までの結果から初期ひび割れの発生要因については、以下のようになとめられる。

- (1) 背面シートを使用することにより背面地山の拘束による初期ひび割れは、抑制することが可能である。
- (2) 覆工コンクリート内部に発生する収縮ひずみは温度収縮より乾燥収縮が支配的である。
- (3) 湿気移動を考慮した評価法を用いた解析の結果、初期ひび割れ発生に最も大きく影響する要因は、坑内湿度である。

以上のことから、本章では、坑内湿度に着目して、覆工コンクリートの乾燥収縮による初期ひび割れを抑制する方法の提案を行う。

7.2 坑内環境と蒸気圧の関係

本章では、内空側の乾燥・放熱を、コンクリート表面と坑内環境（坑内湿度・坑内温度）の蒸気圧差の概念で評価する。蒸気圧は、温度と相対湿度をパラメータとし、式-7.1で表される^{(1)~(4)}。

$$P = RH \times 610.78 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (\text{式-7.1})$$

ここで、 P : 蒸気圧 (Pa)、 T : 温度 (°C)、 RH : 相対湿度 (%)

表-7.1は夏期施工と冬期施工の解析によるひび割れ発生時に着目し、その時のコンクリート温度と坑内環境（坑内温度、坑内湿度）、式-7.1による蒸気圧について整理したものである。ここで、表-7.1に示したコンクリート温度は図-7.1に示した実測結果から解析により得られたひび割れ発生時点のものであり、坑内温度と坑内湿度の値については、図-5.6に示した経時変化から実測結果におけるひび割れ発生時点のものである。また、ひび割れ幅については、夏期施工での観測値が0.04~0.05mm、冬期施工での観測値が0.04~0.5mmであることから、頻度が多いひび割れ幅として夏期施工では0.04mm、冬期施工では0.2mmとした。図-7.2は、表-7.1に示した蒸気圧 P と温度、相対湿度の関係を示したものであり、コンクリートと坑内の蒸気圧差が大きいとひび割れ幅も大きく、蒸気圧が小さいとひび割れ幅も小さい傾向が見られる。

表-7.1 ひび割れが発生する時の坑内環境条件と蒸気圧

		夏期施工	冬期施工
温度(℃)	坑 内	18	18
	コンクリート	19	27
湿度(%)	坑 内	50	42
	コンクリート	100	100
蒸気圧(hPa)	坑 内	10.3	8.7
	コンクリート	22.0	35.7
蒸気圧差(hPa)		11.7	27.0
実測ひび割れ幅(mm)		0.04	0.2

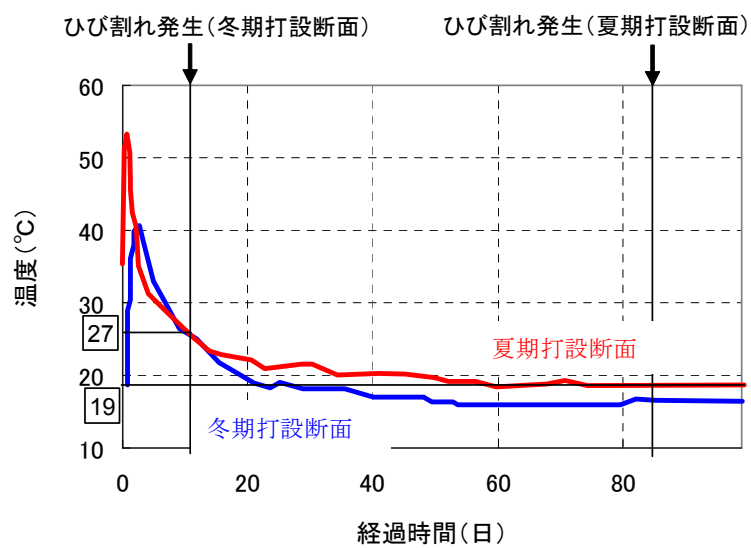


図-7.1 コンクリートの温度変化

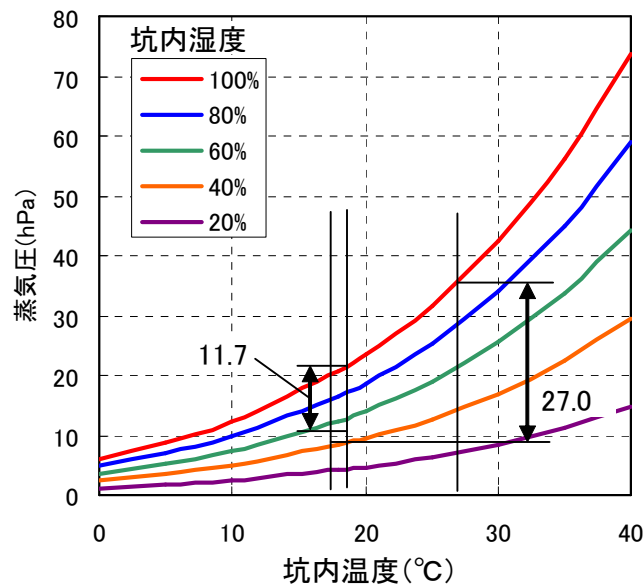


図-7.2 蒸気圧と坑内温度、坑内湿度の関係

7.3 坑内温度と坑内湿度によるひび割れ抑制手法

覆工コンクリートに発生するひび割れ幅の大小が蒸気圧差の大小と関係していることから、蒸気圧を用いた坑内環境（坑内温度、坑内湿度）によるひび割れ幅抑制手法について示す。

ひび割れ幅を抑制するための坑内環境としては、表-7.1の結果から、蒸気圧差を27hPa以下にすることにより0.2mm以上のひび割れ幅は抑制できることが分かる。

ひび割れ幅の制限値については、一般に補修を要する幅は0.2mm以上とされている。従って、0.2mmを制限値として設定すれば、蒸気圧差は安全側とし25hPa程度を管理値として用いることが適当であると考えられる。また、式-7.1を用いると、コンクリート温度が20℃以下であれば、坑内温度が0℃であっても蒸気圧差は25hPa以下となる。このため、コンクリート温度が20℃以上の期間に対して坑内環境の管理を行えばよいこととなる。

この考え方を踏まえて、コンクリート温度と蒸気圧を用いたひび割れ抑制手法のフローを図-7.3に示す。また、このフローに沿った形で例を示す。コンクリート温度を30℃とし、コンクリート相対湿度が100%と仮定すると、このときの蒸気圧Pは式-7.1より42.4hPaとなる。蒸気圧の管理値を25hPaとすると、コンクリート温度30℃の場合のひび割れ幅抑制の蒸気圧は、 $42.4 - 25 = 17.4\text{hPa}$ となり、式-7.1から、この蒸気圧になる坑内温度、坑内湿度の組み合わせが設定できる。図-7.4はコンクリート温度30℃の場合のひび割れ幅を0.2mm以下に抑制する坑内温度と坑内湿度の関係を示したものであり、図-7.4に示す管理領域に坑内環境（温度、湿度）を保つことによりひび割れ幅の制御が定量的に行えることになる。

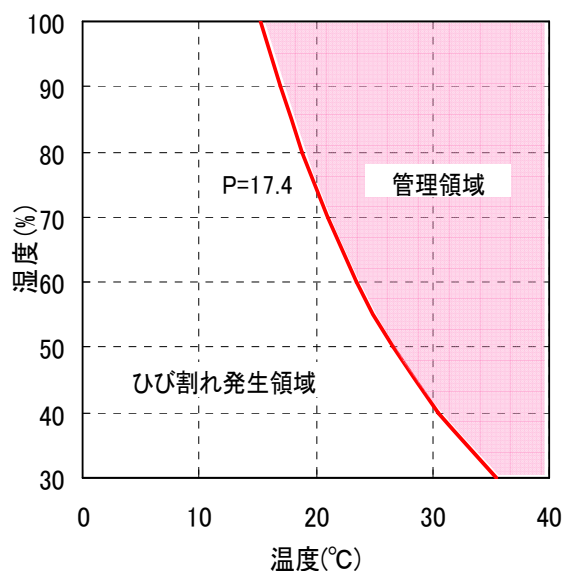
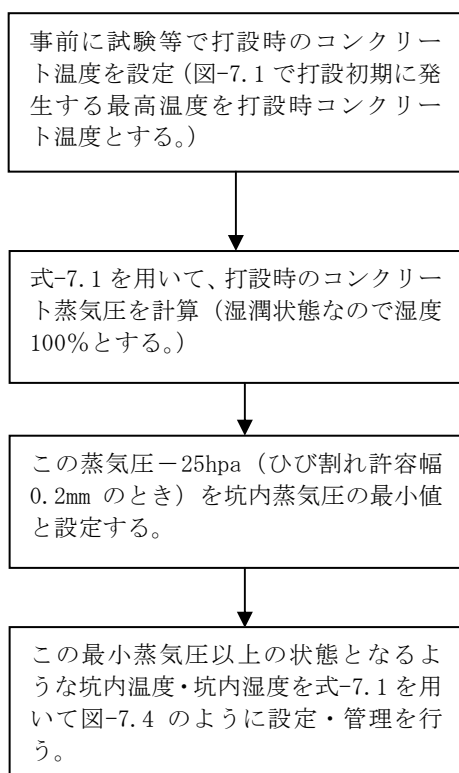


図-7.4 ひび割れ幅抑制管理図
(コンクリート温度 30℃の例)

図-7.3 ひび割れ幅抑制手法のフロー

7.4 まとめ

本章では、ひび割れ発生の主たる要因である坑内湿度を客観的に評価する指標としての蒸気圧の概念を導入し、ひび割れ発生抑制の手法について提案を行った。図-7.4に示すような坑内湿度と坑内温度の管理図を作成し、坑内環境を管理することで、これまでの定性的な覆工コンクリートの養生方法に比べて定量的で効率的な施工ができることが期待できる。



図-7.5 バルーンを用いた養生方法⁵⁾

また、図-7.5に示すように覆工コンクリートの養生方法としてバルーンを用いた養生がよく用いられるが、外気からの遮断を行い、コンクリート表面付近の温度・湿度管理を行っているという点で、本章の蒸気圧を用いたひび割れ抑制方法の理論に合致している。

ここで、フローの始めに設定するコンクリート温度の設定については、図-5.8にあるように打設初期に発生するひずみが大きいことから、これを少なくするために図-7.1に示すコンクリートに発生する最高温度に近づけるようにし、これに合わせて坑内環境をコントロールすることによって、覆工コンクリート表面と坑内との間の蒸気圧差が小さくなるようにすることが重要である。

参考文献

- 1) 白木博昭, 速水昭正, 田中栄治: トンネル二次覆工コンクリートのひび割れ制御対策に関する一考察, 土木学会年次学術講演会概要集 V, PP. 397-398, 1986
- 2) 竈橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析、コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, PP. 685-690, 2001
- 3) 西岡栄香, 原田有: コンクリートの透質率および湿気拡散について, セメント技術報告, X V, PP. 274-278, 1961
- 4) 堀部謙, 森川友博, 中村恭香, 森本博昭: コンクリート中の水分移動解析手法について、コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, PP. 603-608, 2004
- 5) (独) 鉄道・運輸機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, P199, 2008

第8章 結論

本研究で得られた成果をまとめると下記のとおりである。

- (1) 第3章では、東北新幹線トンネルの覆工コンクリートで発生するひび割れについて、現在供用中および施工中のトンネルを用いて施工実態調査を実施した。内容は、コンクリート打設日報等の施工実績とひび割れ展開図から発生箇所、ひび割れ形状の実態調査、および施工環境とひび割れ発生との関係についての調査である。実態調査の結果、天端部で縦断方向に発生するひび割れが卓越しており、パターンは一本に伸びるものが多いことが分かった。このひび割れは、外力によるひび割れの発生状況と類似しており、抑制への取り組みが重要である。また、施工環境やコンクリートの品質と覆工コンクリートのひび割れ発生との関係について調査を行った結果、坑内湿度、坑内温度および打設温度がひび割れ発生に影響すると考えられる。
- (2) 第4章では、第3章で坑内湿度、坑内温度および打設温度がひび割れ発生に影響すると考えられることを受けて、新幹線トンネルを模擬したトンネルの模型を用いて、実際の施工と同一の施工方法による試験を行い、覆工コンクリート全体の収縮ひずみ量と厚さ方向のひずみ分布に着目して、坑内環境（坑内湿度・脱型時間・コンクリート温度）の違いによる覆工コンクリートへのひび割れの入りやすさを定性的に把握した。試験の結果、坑内湿度を低下させた場合や打設時のコンクリート温度を上昇させた場合には打設後、初期に覆工コンクリート表面にひび割れが発生しやすくなることが確認できる。
- (3) 第5章では、東北新幹線八甲田トンネルで夏期に打設した覆工コンクリートと冬期で打設した覆工コンクリートについて冬期の覆工コンクリート打設後、約2年間にわたり、ひび割れ幅、内部ひずみ、表面ひずみの計測を行い、覆工コンクリートに発生するひずみとひび割れ発生との関係を調べた。その結果、覆工コンクリートに発生する内部ひずみに地山側と内空側の差が生じており、夏期施工より冬期施工の方が大きなひずみ差であることが確認できた。このことから覆工コンクリート表面に発生しているひび割れは、覆工コンクリート断面内のひずみ差に関連があることが分かった。一方、表面ひずみは、夏期施工では坑内湿度が急激に低下した際に、冬期施工では脱型直後の坑内湿度50%程度の時に、変動が顕著になり、この際に覆工コンクリートにひび割れが発生したことが分かった。すなわち、坑内湿度の急激な変化によりひび割れが発生していることから坑内湿度、坑内温度がひび割れ発生に影響していると考えられる。

(4) 第6章では、乾燥収縮の影響を湿気 - 応力連成解析を用いて評価する「湿気移動を考慮した評価法」をひび割れ発生メカニズムを表現する方法として提案し、第4章の模型試験および第5章の現地計測結果と比較することにより、この評価法の妥当性と実トンネルでの適用について検討を行った。この結果、湿気移動を考慮した評価法は、模型試験だけでなく、実際のトンネルの覆工コンクリートにおいても内部ひずみとひび割れ発生を精度よく表現できることを示した。また、この評価法を用いることで、ひび割れ発生時期は、坑内湿度が急激に低下したときであり、坑内湿度がひび割れ発生に影響することを示した。さらに、湿気移動を考慮した評価法を用いて、ひび割れ発生要因の特定するために、覆工コンクリートの施工環境（坑内湿度、脱型時間、打設温度、坑内温度）および覆工コンクリートの品質に影響のある単位水量についてパラメータスタディを実施した結果、坑内湿度がひび割れ発生に最も影響のあることが分かった。

(5) 第7章では、第6章までの結果を受けて、覆工コンクリートに発生するひび割れの抑制方法案を示した。本章では、覆工コンクリートの乾燥収縮を抑制する観点から、パラメータに温度と相対湿度を持つ蒸気圧の概念を導入し、コンクリートの表面と坑内湿度・坑内温度の蒸気圧差で評価を行った。この蒸気圧を用いて、第5章の現地計測の結果からひび割れ幅を0.2mm以下にするには、コンクリート内部と坑内との蒸気圧差を25hpa以下に保つような坑内湿度・坑内温度を設定すればよいという例を挙げて、ひび割れ抑制に有効な坑内湿度および坑内温度の範囲の算出方法の提案を行った。

本論文では、山岳トンネルの覆工コンクリートに発生するひび割れについて、模型試験と実際の鉄道トンネルによる計測を行い、その挙動を数値解析にて再現するための手法として「湿気移動を考慮した評価法」を提案した。また、計測結果および数値解析の結果から今回提案した評価法が従来の「土木学会式を用いた評価法」に比して精度が良く、実際のトンネルに対しても適用可能であることを示した。また、覆工内部のひずみ・応力状態を解析で再現することで覆工コンクリート内部においてひび割れが発生する状況の予測が可能であり、ひび割れ発生の時期や発生する深さまで解析可能であることを示した。今後、数値解析の精度を上げるためには、コンクリートのクリープの影響を考慮することや、より多くの事例収集を実施していくこと、さらにコンクリート内部の湿気移動に関する研究の深度化が必要であると考えている。

また、覆工コンクリートのひび割れ発生要因は、坑内湿度が主であることを第6章にて示した。第2章に記したようにこれまで既往の研究や指針類で、坑内湿度とひび割れ発生については定性的には評価されていた内容ではあったが、本論文で定量的に評価すること

ができたことは本論文の一つの成果である。一方で、坑内湿度以外についてはひび割れ抑制への影響について明確な違いを表現するまでには至らなかった。今後、数値解析の精度向上に合わせて、坑内温度、打設温度、脱型時間等の要因別にひび割れ抑制の影響の違いを表現できるようになると考えている。

さらに、第7章の蒸気圧の概念を導入したひび割れ抑制方法は、坑内湿度・坑内温度を適正な範囲に管理することで覆工コンクリートのひび割れを抑制しようとするもので、ひび割れ発生頻度の少ない良質な覆工コンクリートの施工を行うことができる。なお、現場における坑内湿度・坑内温度の具体的管理手法については、実務の場で検討が必要であるものと考えている。

トンネルの覆工コンクリートに発生するひび割れについては、第1章にも記したがトンネルを管理する事業者や社会全体からの目も厳しくなっている。また、施工者にとっても覆工コンクリートにひび割れが発生するということは、それが性能上、問題ないものであったとしても良質な覆工コンクリートを提供できなかったこととなるし、将来の安全性に疑義を残したことになる。本論文では、坑内湿度に着目してひび割れ抑制手法案を提案したが、他の要因との関連が解明されれば、さらに効果のあるひび割れ抑制手法が提案できるものと思う。今後、覆工コンクリートに発生するひび割れに関する研究が進み、覆工コンクリートのひび割れが皆無となることを期待したい。